Über das Gewinderollen

unter besonderer Berücksichtigung der Gewinderollbacken und der plastischen Materialverformung

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Rudolf Seltmann

aus Breslau

Referent:
Prof. K. Gottwein

Korreferent:
Prof. R. Krauß

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juli 1930

Breslau 1930

Über das Gewinderollen

unter besonderer Berücksichtigung der Gewinderollbacken und der plastischen Materialverformung

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Rudolf Seltmann

aus Breslau

Referent:
Prof. K. Gottwein

Korreferent:
Prof. R. Krauß

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juli 1930

Breslau 1930

Druck: Buchdruckerei Paul Moser, Breslau-Deutsch Lissa

Inhaltsangabe:

I. Einleitung: Gründe und Zweck der Untersuchungen.

II. Versuche zur Ermittelung der plastischen Materialverformung beim Gewinderollen

A. Gewinderollen mit plastischer Wachsmasse:
Gewinderollbacke aus Wachsmasse,
Schraubenbolzen aus Wachsmasse, gerollt mit
1) flachen Backen,
2) kreisförmigen Backen;
Gewinde-Zahnprofil aus Wachsmasse, geformt in einem statischen Profil-Preßapparat.

B. Untersuchung gerollter Schraubenbolzen anhand von Schliffbildaufnahmen.

III. Untersuchung der volumetrischen Materialverdrängung beim Rollen mit geradlinig ansteigenden Rollbacken.

IV. Theoretische Entwicklung von Einrollkurven für bestimmte Materialverdrängung und Einrollwege.

V. Untersuchung der Walzdruckfläche.

VI. Gewinderollversuche mit Rollbacken von planmäßig erzeugter Kurvenform:

A. Mechanische Einarbeitung der Rollkurven:
Fräser, Fräsmaschine und Fräsvorrichtungen, Härteversuche mit Spezial-Werkzeugstählen für Rollbacken;

B. Walzdruck-Untersuchungen beim Gewinderollen mit Rollbacken mit geradlinigem Einrollweg und verschiedener Einroll-Länge,
Rollbacken mit besonderen Kurvenformen.

VII. Schluß: Zusammenfassung der Ergebnisse.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die Dissertation wird auch als Auszug im V. D. J.-Verlag erscheinen

Gewidmet

Herrn Dr.-Ing. E. h. Gustav Schmidt

Direktor der Archimedes A.-G. Breslau

I. Einleitung.

Das Einrollen von Gewinde in Schrauben mit Gewinderollmaschinen hat in neuerer Zeit in der Schraubenindustrie immer größeren Eingang gefunden. Maßgebend hierfür ist u. a. die Materialersparnis durch spanlose Verformung und die glatte, riefenfreie Erzeugung der Gewindeflanken, wie sie im Schneidprozeß der Massenfabrikation nicht immer erzielbar ist. Von Vorteil ist auch der gleichmäßigere Ausfall des Gewindes gerollter Schrauben gegenüber geschnittenen, der die heute unbedingt geforderte wahllose Austauschbarkeit zwischen Bolzen und Mutter begünstigt.

Die Güte des gerollten Gewindes hinsichtlich seiner Abweichungen von den theoretischen Maßen ist vom Werkzeug, den Gewinde-Rollbacken, abhängig. Diese übertragen das ihnen als Rillen gegebene Zahnprofil durch die Rollbewegung als Gewinde auf den Bolzen und übernehmen hierbei die Aufgabe der plastischen Verformung des Werkstoffs. Durch sie ist auch der schrittweise Weg dieser Verformung festgelegt, da das Einrollen des Gewindes allmählich während eines bestimmten Rollweges über die Länge der Backen geschieht. Mit diesem Vorgange ist ferner die durch die auftretenden Walzdrücke entstehende Beanspruchung der Rollbacken selbst und der Maschine verbunden.[x] Der durch die Walzbacke gegebene Rollweg hat daher wesentliche Bedeutung und erfordert eine geeignete Wölbung der Rollfläche.

In der Praxis werden die Zahnrillen der Gewinde-Rollbacken bisher allgemein plan eingefräst. Beim Härten der Backen tritt infolge der ungleichmäßigen Abkühlungsgeschwindigkeit des rechteckig gestalteten Körpers ein Verziehen ein, das eine Wölbung der Rollfläche hervorruft. Diese genügt jedoch bei normaler Abkühlungsweise meist nicht und man vergrößert sie daher vielfach dadurch, daß die Walzbacken zum Härten in einem Rahmen eingespannt werden, der sie unter Asbestisolierung an den Seitenflächen umgibt, und dann horizontal mit der Gegendruckfläche zuerst in die Abkühlflüssigkeit getaucht werden. Vielfach wird auch das Einroll- und Auslaufende der Backen vor dem Härten angefeilt. An den Gewinde-Rollmaschinen sind außerdem Stellschrauben angebracht, die es gestatten, die Rollbacken so zueinander schräg zuzustellen, daß das gerollte Gewinde den gestellten Anforderungen entspricht.

Die Erfahrungen der Praxis haben gezeigt, daß es beim Einrichten der Walzbacken in der Maschine häufig große Schwierigkeiten bereitet, ein genügend rund ausgewalztes, kaliberhaltiges Gewinde zu erzielen. Die Begründung ist darin zu suchen, daß sich die Backen beim Härten nicht stets gleichartig wölben. Dieses ist auch nicht möglich, da einerseits selbst bei sorgfältiger Härtung stets kleine Abweichungen in der Behandlung auftreten werden und andererseits der Stahl hinsichtlich seiner Zusammensetzung und seines Gefügezustandes — zumal bei wiederholtem Härten nach erfolgter Nacharbeitung — verschieden ist. Mit dem Austausch verbrauchter Walzbacken in der Maschine gegen neue ist also fast immer ein neues Einrichten und größerer Zeitaufwand verbunden. Diese Arbeit erfordert die Tätigkeit eines geübten Einstellers.

Abgesehen hiervon wird durch die verschiedenartige Ausbildung der Einrollkurve, die sich aus der Wölbung der Backen und ihrer Zustellung in der Maschine ergibt, daß Gewinde schneller oder langsamer eingerollt werden und damit die Druckbeanspruchung der Maschine und der Backen selbst bzw. deren Abnützung ungleichmäßig sein. Beim Rollen von Gewindeprofilen, die an der Grenze der Leistungsfähigkeit der Maschine liegen, kann dann eine Überbeanspruchung des Maschinenständers eintreten.

Neben diesen äußeren Erscheinungen muß besonders der Vorgang im Material des Bolzens durch die Verformung beachtet werden. Ein mehr oder weniger schnelles und gleichmäßiges Herauswalzen des Gewindes dürfte Rückwirkungen auf seine Verlagerung und Verformungsbeanspruchung mit sich bringen. Es ist daher Zweck dieser Arbeit, den Gewinderollprozeß hinsichtlich der Materialverformung bei der Entstehung des Gewindes zu untersuchen und Kurvenformen für Gewinde-Rollbacken zu entwickeln, die eine möglichst günstige Beanspruchung von Werkzeug und Maschine gestatten und ein gut rund ausgewalztes Gewinde hervorbringen. Grundsätzlich sind bei den Versuchen legierte Stähle verwendet worden, die bei geringster Neigung zum Verziehen die obengenannten Nachteile aufheben.

[x] Vgl: Dr.Arbeit W.Reichel,s,S.13

II. Versuche zur Ermittlung der plastischen Materialverformung beim Gewinderollen.

Die plastische Materialverformung beim Gewinderollen geschieht durch das Eindringen der Zahnrillen der Walzbacken in den sich drehenden Bolzen und ein hierdurch bewirktes Verdrängen des Materials nach außen in das Walzprofil hinein.

Dabei tritt ein Recken und Verzerren der Ferritkristalle ein, das eine Veränderung der Festigkeitseigenschaften des Schraubenbolzens gegenüber dem Ausgangsmaterial herbeiführt. Diese besteht, wie ein einfacher Zerreißversuch ergibt, im wesentlichen in einer Erhöhung der Zerreißfestigkeit bei allerdings gleichzeitiger Abnahme der Dehnung. Die Untersuchungen von M. v. Schwarz[1]) stellten ferner eine bedeutende Zunahme des Arbeitsvermögens bei dem Schlagzerreißversuch fest, die daraus erklärt wird, daß bei den geschnittenen Schrauben die Gewindegänge als Kerben wirken, während beim gerollten Gewinde eine nicht zerschnittene und verfestigte Außenhaut vorhanden ist.

Dennoch sind Bedenken gegen das Gewinderollen als einer Kaltverformung entstanden, bei der eine Rekristallisation oder Vergrößerung der Kristallkörner entstehen kann, die die Dehnung und Kerbzähigkeit des Werkstoffes erheblich vermindert. Diese tritt jedoch nur dann ein, wenn eine sogenannte kritische Kaltbearbeitung vorliegt. Als solche stellte A. Pomp [2]) eine Querschnittveränderung von 8—16 % an gezogenem und kaltgewalztem Schraubeneisen mit niedrigem C-Gehalt fest. Auch scheint nach diesen Untersuchungen die ungünstige Veränderung der Materialeigenschaften besonders bei nachfolgendem Anlassen und Erwärmen auf Temperaturen über 200 ° und zumal zwischen 650 ° und 900 ° vorsichzugehen. Ferner nimmt die Rekristallisationsgefahr bei zunehmendem C-Gehalt des Werkstoffs ab und verschwindet bei 0,2 % C praktisch vollständig.

Für gerolltes Gewinde liegen Untersuchungen über die Frage der Rekristallisation noch nicht vor. Ein direkter Vergleich des Vorganges bei diesem Verfahren mit dem beim Ziehen oder Walzen erscheint kaum angängig, da keine Vergrößerung oder Verminderung des gleichen, runden Querschnitts sondern eine Veränderung der Querschnittsform selbst stattfindet.

Aus eigenen Versuchen, über die hier kurz berichtet werde, ging hervor, daß die Kernverfestigung beim Ziehen erheblich größer ist als beim Gewinderollen. Ein gerollter Schraubenbolzen ½" z. B. hatte nach dem Abdrehen auf 7 mm Durchmesser eine Zerreißfestigkeit von 45 kg oder 3 kg mehr als das Schraubeneisen derselben Stange. Demgegenüber hatte dasselbe Material eine Festigkeit von 51, 57 bzw. 65 kg nach dem Ziehen um 5, 10 und 20 % des Querschnitts und Abdrehen auf ebenfalls 7 mm Durchmesser. Die Dehnungen betrugen 20 % beim Rollen und 19, 12 und 11 % beim Ziehen. Das günstigere Verhalten des gerollten Bolzens trat auch dadurch hervor, daß die nach dem Rollen von 38 % auf 20 % gesunkene Dehnung nach dem Abdrehen des Gewindes wieder auf 28 % anstieg. Die hohe Dehnung des hier verwendeten Materials stellt keine Ausnahme dar, sondern entspricht der meist bei Schraubeneisen vorhandenen Dehnung. Trotz der erheblichen Abnahme der Dehnung durch das Rollen genügt sie daher mit ca. 20 % immer noch für eine volle Verwendungsfähigkeit der Schraube.

Tatsächlich finden auch Schrauben mit gerolltem Gewinde seit Jahren als Maschinenschrauben erfolgreiche Verwendung. Bei Schrauben für Sonderzwecke, bei denen Wechselbeanspruchungen und erhebliche Erwärmungen auftreten, ist abgesehen hiervon ein Glühen auf eine Temperatur über dem oberen Umwandlungspunkte (ca. 900 °) angebracht und wird auch von seiten der Schraubenhersteller vorgenommen, da dann die Reckung der Kristalle aufgehoben und die normalen Festigkeitseigenschaften wieder erreicht werden. Bei härterem Material mit über 0,2 % C-Gehalt, wie es für Schrauben des Kraftfahrwesens verwendet wird und auch W. T. Schaurte [3]) für schwächere Schrauben bis ½" Durchmesser empfiehlt, findet allgemein für das Vergüten ein Erwärmen auf diese hohe Temperatur statt, trotzdem die Rekristallisationsgefahr an sich hier nicht mehr besteht.

Scheint demnach die Frage der Rekristallisation heute schon von geringerer Bedeutung für das Gewinderollen zu sein, so ist außer den mit der Kaltverformung an sich verbundenen Erscheinungen im Flußeisen ferner die Umformung des Werkstoffs bei der eigentlichen Entstehung des Gewindes am Bolzen durch den Rollvorgang noch nicht genügend geklärt worden. Aus diesem Grunde wurden auch vielfach Zweifel hinsichtlich seiner genügenden inneren Festigkeit erhoben. Schliffbilder von gerollten Schrauben (Abb. 1, Tafel I) lassen eine der Form des Zahnes entsprechende Umlenkung der Kristalle erkennen, ohne daß jedoch bei der Kleinheit der walzbaren Profile und der bei Flußeisen fehlenden ausgeprägten Schichtenbildung der eigentliche Materialfluß deutlich wird.

Daher wurden Versuche durchgeführt, die dartun sollten, ob der Rollprozeß an sich eine homogene Bildung des Gewindezahnes gestattet und wie dieser schrittweise erzeugt wird. Diese Versuche wurden zunächst mit Hilfe plastischer Maße ausgeführt und dann mit den Vorgängen im Eisen an besonderen Schraubenbolzen verglichen.

Versuche mit plastischer Masse.

Plastische Masse wurde verwendet, weil diese wegen ihrer leichteren mechanischen Verformbarkeit und der Möglichkeit einer Uebereinanderlegung von verschieden gefärbten Schichten besonders bei Benutzung größerer Gewindeprofile ein klares Bild der Verformung durch den Rollprozeß zu geben versprach. Allerdings kann die plastische Masse einem kristallinen Metallkörper nicht gleichgesetzt werden;

[1]) M. v. Schwarz. Werkstatt-Technik. 15. VII. 24

[2]) A. Pomp, „Rohe Schrauben" der Bauer und Schaurte A.-G. Neuß 1927.

[3]) W. T. Schaurte, Anforderungen an Schrauben- und Mutterneisen. „Sonderdruck aus Stahl und Eisen als Werkstoff", Verlag Stahl und Eisen, 1927.

zahlreiche Versuche beweisen jedoch, daß ihre Verformungseigenschaften jenen sehr ähnlich sind.

Gewinderollbacke aus Wachsmasse.

Als erster Versuch wurde ein 5" Gewinde gewalzt. Dabei wurde der umgekehrte Weg des Einwalzens von Zahnrillen in eine Walzbacke aus Masse mit einer gedrehten Gewinde-Stahlrolle beschritten. (Abb. 2). Die Walzbacke aus plastischer Masse

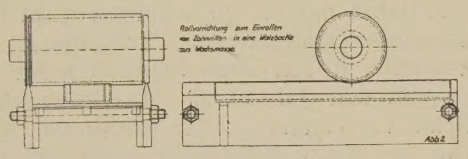


Abb. 2

wurde so hergestellt, daß ein Blechkasten von der Länge etwa des Bolzenumfangs mit der Masse ausgegossen wurde. Auf eine dickere Unterschicht wurden hierbei nacheinander verschieden gefärbte Schichten aufgegossen, die jedesmal mit einer feinen Schneide über dem ebenen Rand des Blechkastens abgezogen wurden, bevor die nächste Schicht darüber gegossen wurde. Der Boden des Blechkastens war nur eingelegt und konnte zum Abrichten der Schichten mit der bereits aufgegossenen Masse um so viel tiefer gelegt werden, daß die neue Schicht die gleiche Stärke bekam. Die Schichten waren wegen der geringen Profilhöhe von 5,915 mm nur 1 mm hoch. Um ein Hochwalzen der Masse zu erreichen, hatte der Kasten die genaue Breite der Gewinderolle, seine Längswände liefen in der Steigungsrichtung des Gewindes und waren etwa um so viel höher gehalten, als der Anstieg des Materials betragen konnte. Die Walzrolle lief mit Spurscheiben, deren Durchmesser gleich dem Flankendurchmesser des Gewindes war, auf prismatischen Schienen, so daß ein richtiges Abrollen des Gewindes stattfand. Die plastische Walzbacke war gegenüber dem horizontalen Rollweg schräg zugestellt, und wurde bei mehrmaligem Durchrollen des Bolzens langsam höher gestellt, bis ein Auswalzen des Zahnprofiles an einem Ende des Kastens erfolgt war. Als plastische Masse wurde eine Zusammensetzung aus Bienenhonig, zäher Vaseline und Kreide verwendet, wie sie ähnlich P. Unckel [1]) benutzte. Jedoch mußte die Kreide durch feine Schlämmkreide ersetzt werden und es wurden auch nur zwei Teile hiervon zugesetzt, da sich obige Zusammensetzung für die hier infrage kommenden dünneren Schichten als zu grob erwies.

Abbildung 3, Tafel I, zeigt Querschnitte durch die gerollte Backe aus plastischer Masse, die die Reihenfolge des Verformungsprozesses erkennen lassen. Hiernach scheint beim Eindringen der Gewindezähne die verdrängte Masse sich zunächst an ihnen hochzuwölben. Dieser Vorgang verstärkt sich bei tieferem Eindringen der Zähne und gleichzeitig tritt ein Überziehen der ersten Materialschicht über die zweite und folgenden ein, indem die Zahnflanken das Material mitreißen. Die zweite Schicht zeigt die Spitzenbildung und das Ueberziehen über die unter ihr befindlichen Schichten in abgeschwächter Form. Diese Erscheinungen dürften bei größerer Unterteilung der Schichten sich in gleicher Weise bemerkbar machen. Im weiteren Verlauf des Rollens tritt unter Verjüngung des entstehenden Zahnes eine Näherung der Spitzen und schließlich ein Verschmelzen ein. Hierbei entsteht gleichzeitig durch die Druckwirkung eine Wölbung der tiefer liegenden Schichten nach oben.

Dieser erste Versuch gestattet folgende kritische Betrachtung: die plastische Masse der gewählten Zusammensetzung erwies sich als günstig für die Zusammensetzung feiner Schichten, da diese während der Verformung ihre gegenseitige Bindung behielten. Außerdem konnte ein ungefähres Bild der Materialverformung beim Gewinderollen aus der Verlagerung der Schichten gewonnen werden. Die durch den Preßdruck erfolgende Wölbung der Schichten und ihr Ueberziehen an den Zahnflanken schien möglich, während das Hochfließen des Materials in zwei Spitzen und schließliche Verbinden zur Zahnspitze wahrscheinlich nicht dem tatsächlichen Vorgange entsprach. Würden die Gewindezähne beim Rollen tatsächlich in dieser Weise gebildet werden, so wäre der Rollprozeß allerdings als geringwertig anzusehen.

Zum Vergleich der letzteren Erscheinung mit dem tatsächlichen Vorgange beim Gewinderollen wurde ein Bolzen aus Schraubeneisen konisch gedreht und gerollt. So erhält man eine von Gang zu Gang tiefere Auswalzung des Gewindes. Nach Abb. 4, Tafel I, wölbt sich der Werkstoff hier bei den ersten Gängen wie bei dem Versuche auch an den Zahnflanken hoch, gleicht sich jedoch bei dem nachfolgenden stärkeren Auswalzen wieder aus und es erfolgt dann ein weiteres gleichmäßiges Hochfließen in die Gewindezahnspitze.

Die bei dem Versuch erzielte Ausbildung eines unganzen Gewindezahnes muß daher auf einen Mangel der Versuchsanordnung zurückgeführt werden, der wohl durch die Anordnung des umgekehrten Vorganges d. h. des Einrollens einer Walzbacke durch einen Gewindebolzen entstanden ist. Auch beim Gewinderollen am Schraubenbolzen mittels Gewinde-Rollbacken muß unganzes Gewinde auf fehlerhaftem Walzprozeß beruhen. Dieses ist z. B. dann der Fall, wenn die Backen nicht richtig zueinander eingerichtet sind. Dann entsteht ein Ueberschieben des Materials an den Flanken, das sich gleichfalls in einer doppelten Spitzenbildung auswirkt, die aber bei vollausgewalztem Gewinde äußerlich nicht erkennbar ist. Auch bei dem gerollten Kupferbolzen von M. v. Schwarz [2]) kann wahrscheinlich das Ueberschieben des Materials auf eine Unstimmigkeit in der Einstellung der Backen oder auch eine Ungenauigkeit in der Steigung dieser selbst zurückgeführt werden.

Der erste Rollversuch mit plastischer Masse lehrte im übrigen, daß selbst das 5" Gewindeprofil zu klein ist, um die Schichtenformung klar erkennen zu können. Bei einer bedeutenden Vergrößerung des Profils ergab sich jedoch die Schwierigkeit, daß es kaum möglich schien, ein großes Gewinde mechanisch zu walzen. Um den Versuch zu verein-

[1]) P. Unkel: Über die Fließbewegung im plastischen Material. Berlin 1928, Springer.

[2]) M. v. Schwarz: Werkstatt-Technik, 15. VII. 1924.

fachen, wurde daher auf einen Bolzen mit mehreren Gewindegängen verzichtet und auch die Steigung fallen gelassen, so daß eine Walzrolle von der Breite des Profils entstand. Zu diesem Vorgehen berechtigte die Tatsache, daß die Steigung des Schraubengewindes sehr gering ist und daher bei der Verformung keine besondere Rolle spielen kann. Zudem besteht eine Gleichheit des Verformungsprozesses für jeden Gewindezahn, die es gestattet, sie an dem einzelnen Zahn zu beobachten.

Schraubenbolzen aus Wachsmasse,
gerollt mit flachen Backen.

Erster Rollversuch.

Der folgende Versuch wurde mit einer Walzrolle von 350 mm Durchmesser auf einer Langhobelmaschine von 500 mm Durchgang und 1200 mm Tischbewegung ausgeführt. (Abb. 5, Tafel VII). Der Tisch diente hierbei als Schlitten für die bewegliche Walzbacke, während die feste Backe einerseits am Querhaupt der Maschine befestigt war und am anderen Ende durch einen Balken gestützt wurde. Die Walzbacken waren aus Buchenholz gefertigt und das Profil, (Abb. 6), wurde in sie mit einem sich drehenden Formstahl auf der Horizontal-Fräsmaschine eingehobelt. Die bewegliche Walzbacke bekam einen der zunehmenden Eindringtiefe entsprechenden schrägen Anstieg und konnte in gleicher Lage durch schraubbare Untersätze nach der festen Backe zu höhergestellt werden. Hierbei sicherten seitliche Führungen ihre parallele Lage gegenüber der festen Backe. Da die Tischbewegung nur ein jedesmaliges Abrollen ungefähr der halben Walzrolle bei einem Hingang gestattete, mußte das Profil allmählich eingerollt werden. Nach jedem Vorwärtsgang des Tisches wurde deshalb die bewegliche Walzbacke gegenüber der festen durch Höherschrauben der Untersätze zugestellt, bis das Profil voll eingewalzt war. Die Walzrolle wurde hierbei mit Beginn eines jeden neuen Tischvorganges in der Stellung weitergerollt, die sie am Ende des vorhergehenden Hubes bekommen hatte, so daß ein dem eigentlichen Gewinderollen nahezu gleiches, ununterbrochenes Rollen der Walzrolle erfolgte. Während des Walzens stieg die Masse der Rolle infolge der seitlichen Verdrängung durch das negative Zahnprofil an und die Rolle hatte nach erfolgter Auswalzung einen Durchmesser der um etwa Profilhöhe größer geworden war.

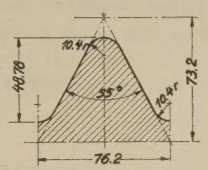


Abb. 6

Das Walzen mit negativem Zahnprofil kann dem Walzen mit positivem Profil gleichgesetzt werden, da auf einer Gewindewalzbacke sich positive und negative Profile abwechseln. Hier hat die Verwendung des negativen Profiles den praktischen Vorteil, daß man einen positiv gewalzten Zahn erhält. Auch wäre andernfalls die Masse durch den Preßdruck nach außen statt nach innen gedrängt worden und hätte ein Hochfließen an den Führungsscheiben der Rolle bewirkt. Hierbei wäre durch die Berührung der Masse mit den vertikalen Metallwänden eine Unstimmigkeit gegenüber dem wirklichen Walzprozeß eingetreten.

Die Walzrolle hat einen Holzkern von 200 mm Durchmesser mit einer Bohrung von 20 mm Durchmesser. (Abb. 7, Tafel VII). Um diesen wurde die Masse in liegendem Zustande gegossen. Hierbei diente eine sperrholzartig zusammengesetzte Holzplatte als Unterlage und ein Blechring als Begrenzung, der in die Holzplatte eingelassen war und nach erfolgter Erstarrung der Masse nach Art einer Springform gelöst wurde. Unter dem Holzkern lag eine Eisenplatte, um ein Anhaften der Masse an dem Holz zu verhindern. Diese Platte wurde dadurch von der Rolle entfernt, daß sie von der unteren Seite erwärmt wurde, nachdem die Rolle aus der Form herausgehoben worden war. Die Rolle selbst wurde zwischen den Spitzen einer Drehbank abgedreht. Vorversuche ergaben anfangs Fehlresultate, indem der Massering sich beim Rollen von dem Holzkern löste und sich dadurch sofort unrund drückte. Der Holzkern wurde deshalb auf seinem Umfange mit einer Schwalbenschwanznute versehen und, da dies nicht genügte, wurden noch radial ververlaufende Bleche eingesetzt, die in die Masse hineinragten, um ihr einen gewissen Halt zu geben. Eine Beeinträchtigung der Verformungszone konnte bei der starken Ringschicht aus Wachsmasse hierdurch nicht eintreten. Schließlich wurde der Holzkern noch auf seinem Umfange stark aufgerauht. Auch nach diesen Maßnahmen trat zunächst noch ein Lösen der Masse von dem Holzkern ein. Als Ursache konnte festgestellt werden, daß infolge des Zusammenziehens der Masse beim Erstarren keine ringsum gute Verbindung mit dem Holzkern zustande kam. Es wurde deshalb die Masse nach der Erstarrung am Umfange des Holzringes wieder teilweise herausgeschnitten und mit einem Bunsenbrenner neu eingeschmolzen. Hierdurch wurde jetzt ein genügendes Haften der Masse an dem Holzkern bis zum vollen Auswalzen des Profiles erreicht.

In die Masserolle wurde ein besonderes Stück eingesetzt, das aus mehreren farbigen Schichten zusammengesetzt war. Das Einsetzen erfolgte durch schwalbenschwanzförmiges Ausschneiden eines entsprechend großen Stückes der Rolle und nachheriges Umgießen des eingesetzten Stückes in der Form, wodurch eine Verbindung zwichen der Masse der Rolle und dem Einsatzstück hergestellt wurde. Dabei war es notwendig, beide genügend vorzuwärmen, weil sonst keine innige Verbindung zustande kam. Die Temperatur der flüssigen Masse beim Umgießen durfte andererseits nur so hoch sein, daß ein Anschmelzen der zu verbindenden Teile nicht eintrat. Das farbige Einsatzstück wurde aus Schichten zusammengesetzt, nicht, wie bei der Walzbacke, übereinander gegossen. Die Schichten wurden als Platten in der benötigten Höhe und Breite, jedoch größerer Länge in einem Holzrahmen gegossen (Abb. 8). Sie wurden nach dem Erstarren über dem Rand des Kastens auf genaue Höhe mit einem Stahlband abgezogen und auf richtige Breite geschnitten. Diese Art der Herstellung der Schichten erwies

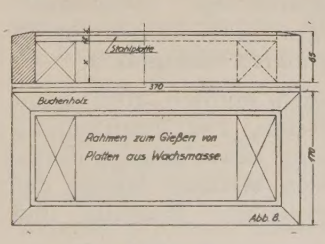


Abb. 8

sich als günstiger als das Gießen von Blöcken und Zerlegen derselben in Schichten, denn bei dem Erstarren der Blöcke trat eine Seigerung und Lunkerbildung ein, die keine Homogenität der Masse ergab. Die wie oben hergestellten Schichten wurden vorgewärmt, mit der jeweils zu verbindenden Seite auf eine heiße Platte gelegt und unter Druck schnell zusammengepreßt.

Abb. 9, Tafel I, zeigt den kreisförmigen Ausschnitt der auf der Hobelmaschine gewalzten Rolle aus Wachsmasse, an der Stelle des Einsatzstückes in Ansicht. Der Ausschnitt ist durch radiale Schnitte unterteilt, die in Abb. 10, Tafel I nebeneinander gelegt sind.

Bild 11, Tafel II, stellt eine Vergrößerung der drei unteren Reihen von Abb. 10 und Abb. 12, Tafel II das Mittelstück von Abb. 11 in weiterer Vergrößerung dar. In Abb. 13 ist das Ringstück von Bild 9 senkrecht zur Achse in der Mitte des Profils durchgeschnitten und auf Abb. 14 sind weitere Schnittbilder einer der Profilhälften in Parallelschnitten zu sehen.

Nach Abb. 12 tritt beim Walzen ein Hochwölben der Schichten in das Profil ein. Gleichzeitig erfolgt eine verschiedenartige Dickenänderung der Schichten.

Die stärkste Wölbung liegt in der Mittelachse des Profils, wo auch die Schichten am meisten verdickt sind. Nach den Flanken zu entsteht ein Überziehen und ein gleichzeitiges Auseinanderziehen der Schichten nach dem Profilgrunde zu. Da die Zahl der Schichtlinien noch kein klares Bild der Gesamtverformung ergibt, wurde dieser Versuch mit einer größeren Anzahl von Schichten wiederholt, worüber weiter unten berichtet wird. Eine Zerstörung der Fasern durch Hochwalzen von Materialspitzen wie bei dem ersten Versuche mit der Walzbacke aus Wachsmasse ist hier jedoch nicht eingetreten. Auch die Oberfläche des entstehenden Zahnes verhielt sich während des Walzens ebenso wie bei dem konisch gerollten Bolzen (Abb. 4, Tafel I). Der Zahngrund Abb. 12 zeigt eine besondere Erscheinung. Die dunkleren Materialschichten sind hier radial verdrängt worden und durch die weißen ersetzt. Dieses erklärt sich anhand von Abb. 9 bis 11 daraus, daß beim Rollen nicht nur ein senkrechtes Herauspressen des Materials in das Profil hinein stattfindet, sondern durch den Flankendruck und das Kneten während der Rollbewegung auch ein Ueberziehen und Verschieben der diesen Flanken zunächst liegenden Masse in entgegengesetzter Drehrichtung des Bolzens entsteht. Je stärker diese Druckwirkung auftritt, desto größer ist das Verschieben des Materials auf den Zahnflanken. Auch muß sich der Druck dann tiefer nach innen auswirken. Die in den Querschnitten ersichtliche augenförmige Materialverdrängung ähnelt der Fließfigur der Gleitlinienscharen beim Eindringen eines gerundeten Stempels [1]).

Ähnliche Druckwirkungen müßten auch beim Rollen von Schrauben auftreten. Die Verdrängung des Materials in der Richtung des Umfangs dürfte jedoch bei Stahl und anderen Metallen infolge der größeren Widerstandsfähigkeit der Kristalle und deren Zusammenhang untereinander nicht bedeutend sein.

Die Eigenart der Materialverdrängung beim Gewinderollen hängt mit der Walzphase des Bolzens zusammen. Diese bildet sich beim Einrollen des Profils an den beiden Stellen des Bolzenumfangs die jeweils unter dem Druck der Zahnrillen der Walzbacken stehen, nimmt dabei die Form der Zahnrillen an, soweit der Bolzen mit seinem Umfange bereits in die Backen hineingepreßt ist, und ist bis zur vollen Ausrundung des Gewindes vorhanden. Der Bolzen hat also während des Rollens zwei flache Druckstellen, die dem Profilwinkel der Backen entsprechen und durch den kreisförmigen Abschnitt des mit ihnen im Eingriff befindlichen Bolzenquerschnitts begrenzt sind. Diese Abflachung oder Walzphase des Bolzens, auf die hier noch später eingegangen wird, ändert ihre Größe vom Beginn des Walzens ständig und geht bei dem vollausgewalzten Gewinde in die Berührungslinie zwischen diesem und dem hierauf senkrecht stehenden Zahnrillenprofil der Walzbacken über.

So berührt z. B. der vollausgewalzte Bolzen S, Abb. 15, welcher hier als Rolle und ohne Steigung angenommen ist, die Profillinien der Walzbacke nur längs der Umrißlinie ihres Querschnitts A C B.

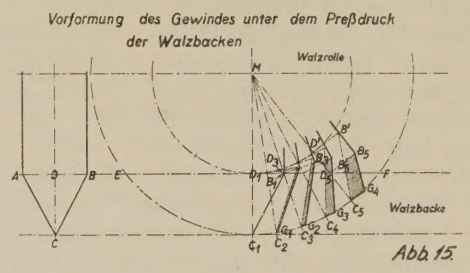


Abb. 15.

Die Höhe des Walzprofils und zugleich Größe der Eindringtiefe ist C D. Der im Eingriff befindliche Kreisabschnitt ist durch die Sehne E F am Bolzen und den Bogen über ihr begrenzt. Alle Radialschnitte des Bolzens, wie M C_1, M C_2, usw. haben das gleiche Profil, das dem Backenprofil entspricht.

Denkt man sich jedoch den im Eingriff stehenden Kreisabschnitt des Bolzens im Profil der Walzbacke gepreßt, so entstände hierdurch die größtmögliche Walzphase und jeder Radialschnitt des Bolzens mit Ausnahme desjenigen, der auf der Walzbacke senkrecht steht, hätte ein anderes und zwar trapezförmiges Profil. Auch der Profilwinkel ist dann nicht gleich, sondern entspricht den schrägen Schnitten durch das Walzbackenprofil. So hat z. B. das halbe Profil des Radialschnitts M C_3 die trapezförmige Gestalt D_3, C_3, G_2, B_3 und des Schnitts M C_5 die Gestalt D_5 C_5 G_4 B_5 gegenüber dem senkrechten Profilschnitt D_1 B_1 C_1. Die Form des Radialschnittes M C_1 bis M C_5 ändert sich derart, daß das Trapez an Breite ab- und an Höhe zunimmt, wobei sich gleichzeitig der Flankenwinkel vergrößert.

Beim Gewinderollen erfolgt wegen der schrägen Zustellung der Backen — und deren gewölbter Form — das Herausfließen des Materials während der Drehung des Bolzens in den sich vergrößernden Umfang. Dadurch tritt, indem die Walzphase entsteht, ein ähnliches Vorformen der radialen Querschnitte ein. Dieser Vorgang ist aber wegen des

[1]) L. Prandtl, Göttingen, Z. a. M. M. Bd. 3.

meist längeren Einrollweges, der hier nur ca. 45° betragen würde und der daher geringeren Materialverdrängung praktisch bedeutend abgeschwächt.

Ein Vergleich der wie oben vorgeformten Radialschnitte von M C_5 bis M C_1, dem endgültigen Gewindeprofil, zeigt im übrigen, daß die Abnahme der Trapezbreite von z. B. D_5 B_5 am Schnitt D_5 C_5 G_4 B_5 auf D_5 B'_5 des Gewindeprofils D' C_5 B' durch den von beiden Seiten nach innen zu wirkenden Preßdruck der Flanken der Walzbackenprofile vorsichgehen muß. Während dieses Flankendrucks drehen sich die radialen Schnitte am rollenden Bolzen gegenüber der Walzbacke und haben also eine stets wechselnde Stellung zu ihnen.

Hierbei treten Druckwirkungen und Materialverschiebungen auf, deren Richtung im wesentlichen aus den Zykloidenbahnen der Materialteilchen des Bolzens und dem durch die Profilfläche gegebenen Widerstand resultieren.

Abb. 13 und 14, Tafel II zeigen ferner, daß eine Krümmung des Einsatzstückes eingetreten ist. Diese Krümmung ist im Gegensatz zu der Materialverschiebung an den Flanken in der Drehrichtung des Bolzens erfolgt, wie auch aus Abb. 9 ersichtlich ist und hängt offenbar mit dem Walzdruck unter der Walzphase zusammen. Der das farbige Stück umgebende dunklere Streifen ist die beim Einsetzen zur Verbindung mit der Rolle herumgegossene Masse.

Schraubenbolzen aus Wachsmasse,
gerollt mit flachen Backen.

Zweiter Rollversuch.

Die Verformungserscheinungen dieses Versuchs werden ergänzt durch die Schnittbilder eines zweiten auf der Hobelmaschine gerollten Bolzens ausWachsmasse, dessen Einsatzstück aus einer größeren Anzahl von Schichten zusammengesetzt war. (Abb. 16 bis 18, Tafel V). Sie geben ein deutlicheres Bild des Zahnes, der durch Wölben, Stauchen und Recken jeder Schicht und in stetem Zusammenhange aller Schichten miteinander geformt ist. Hierdurch wird die Homogenität des Materials im Gewindezahn, die auch der erste Bolzen erkennen ließ, bestätigt. Nach der Ausbildung der Schichtenlinien scheint das Material des Bolzens während des Rollens einerseits unter dem direkten Flankendruck und Vorschub des Walzbackenzahnes mit nach unten gezogen zu werden, während es andererseits dem in der Mitte des Zahnes entstehenden Reaktionsdruck folgt und sich nach oben wölbt. Mitte und Flanken unterliegen der größten Verformung; das dazwischen liegende Material steht unter dem Einfluß beider und von den beiden Seiten nach innen zu abnehmender Druckwirkungen, die sich in etwa einer Parallellinie zu den Flanken treffen, auf der daher die geringste Aenderung in der Stärke der Schichten vorhanden ist. Im Zahngrunde ist auch bei diesem Versuche die Verlagerung der farbigen Schichten eingetreten, die aus den zusammengelegten Profilschnitten nach Bild 16 und den der Reihe nach aufgelegten Schnitten in Abb. 18 zu erkennen ist. Die Störung der Schichten im Zahngrunde gestattete gleichfalls nicht, ein Bild von der eigentlichen Schichtenverformung an dieser Stelle erhalten. Da der Grund hierfür offenbar in der Rollbewegung zu suchen ist, wurde ein statischer Preßversuch vorbereitet, mit dem eine von dem Rollvorgang abstrahierende und durch Pressung allein erfolgende Materialverformung vorgenommen werden sollte.

Schraubenbolzen aus Wachsmasse,
gerollt mit kreisförmigen Backen.

Vor diesem Versuch wurden noch zwei weitere Rollversuche ausgeführt, über die zunächst berichtet werden soll. Bei ihnen wurde eine wie vorher präparierte Rolle aus plastischer Masse mit einer kreisrunden Walzbacke auf einer Fräsmaschine gerollt. Die Verwendung scheibenförmiger Werkzeuge zum Einrollen von Gewinde findet im allgemeinen nur auf der Drehbank statt und ist heute weniger im Gebrauch. Das Gewinde entsteht in ähnlicher Weise wie beim Rollen mit flachen Backen durch allmähliches Tiefereindringen des Werkzeugs in den zu walzenden Bolzen, in dem dieses gegen jenen vorgeschoben wird. Es muß daher die Materialverformung auch gleichartig vorsichgehen. Die Eingriffsverhältnisse zwischen Walzscheibe und Walzbolzen sind allerdings hier die zweier runder Körper ineinander, wodurch eine andere Phasenbildung entsteht. Dieser Versuch gestattete das ununterbrochene Einrollen des Walzprofils und kommt dadurch dem Rollprozeß beim Gewinderollen am nächsten.

Die allgemeine Anordnung des Versuchs zeigt Abb. 19, Tafel VII. Die einwalzende hölzerne und mit negativem Profil versehene Scheibe sitzt auf der Frässpindel und ist angetrieben. Gegen sie wird die auf dem Horizontalschlitten zwischen Böcken montierte und in Kugeln gelagerte Masserolle mechanisch vorgeschoben und dabei von der angetriebenen Scheibe mitgenommen. Praktisch wird meist in umgekehrter Weise das zwischen den Spitzen der Drehbank sitzende Werkstück angetrieben und das kugelgelagerte Werkzeug durch den Walzdruck mitgenommen. Für die Verformung können jedoch Unterschiede hierdurch nicht entstehen.

Das Ergebnis der Versuche zeigen Abb. 20 und 21, Tafel III für farbige Schichten und Abb. 22 und 23, Tafel III für ein einfarbiges Einsatzstück. Die bei den vorhergehenden Versuchen erfolgten Materialverschiebungen sind hier ganz gleichartig eingetreten, weshalb nicht mehr darauf eingegangen werden soll. Besonders deutlich ist jedoch gerade die durch den Walzdruck der Flanken beim Rollen hervorgerufene Mitnahme der Materialschichten, Abb. 20 und 21, und ihre nach dem Zahngrunde zu zunehmende tangentiale Verdrängung zu erkennen.

Wenn auch, wie bereits oben gesagt wurde, eine derartige Verschiebung des Materials beim Gewinderollen eines Schraubenbolzens wahrscheinlich nur in sehr geringem Maße eintreten dürfte, weil die Kristalle des zähen Schraubenwerkstoffes gegenüber der weichen plastischen Wachsmasse einen besseren Zusammenhang haben, so ist doch zu berücksichtigen, daß diese Verschiebungen Folgeerscheinungen der auftretenden Drücke sind, die gleichartig auch beim Rollen von kristallinem Material auftreten müssen. So betrachtet geben sie ein Bild über den pressenden Einfluß der Flanken

und Rundungen. Die Profilbildung kann auch nicht allein durch rein radiales Herausdrücken des Materials, sondern nur unter gleichzeitiger tangentialer Verschiebung erfolgen. Hierfür spricht schon die Tatsache, daß der Umfang des Bolzens infolge seines größer werdenden Durchmessers zunimmt. Sie entsteht aber auch durch die Bewegung der Masseteilchen beim Rollen in je nach dem Radius verschiedenen Zykloidenbahnen. Ausgehend von dem Walzdurchmesser des Bolzens als Rolldurchmesser beschreiben die auf ihm liegenden Teilchen gemeine oder spitze Zykloiden, alle innerhalb liegenden verkürzte oder abgerundete Zykloidenbahnen. Während des beim Rollen erfolgenden Verdrängens werden die Masseteilchen teils, wie aus den obigen Versuchen hervorging, nach innen hineingezogen, so besonders die der direkten Druckwirkung der Flanken unterliegenden Partikelchen, teils durch das Herauswalzen des Profils über den Rolldurchmesser hinausgedrückt und beschreiben dann verlängerte, schleifenbildende Zykloiden. Während des Walzvorganges behält keines der Verformung unterliegende Masseteilchen seine ursprüngliche Bahn bei, sondern ändert sie dauernd.

In Verbindung hiermit ist zu beachten, daß bei dieser Bewegung eine rein radiale Druckwirkung nur bei den Teilchen erfolgen könnte, die im Moment der Bewegung gerade senkrecht über der Walzkurve der Backe stehen und den Umkehrpunkt ihrer Zykloide erreicht haben. Hier ist aber auch die Einschränkung durch den größer werdenden Bolzendurchmesser gegeben. Infolge der beim Rollen zunehmenden Eindringtiefe der Walzbacke in den Bolzen und der dadurch entstehenden Walzphase kommen die Teilchen schon vor dem Umkehrpunkte ihrer Bahn mit den Profillinien der Walzbacke in Berührung und bleiben in dieser Berührung bis zu ihrem Umkehrpunkte. Ihre Geschwindigkeitsrichtung ändert sich hierbei in jedem Augenblick der Eingriffsbewegung und es tritt auch eine stets sich ändernde Raktionsdruckwirkung auf, da die Stellung der Zahnrillen und mithin ihre Druckflächen sich gegenüber dem rollenden Bolzen ständig verändern.

Die Auswirkung dieser Erscheinung als eine nicht radiale Materialverschiebung beim Gewinderollen ist allerdings nicht bedeutend, da die Durchmesserdifferenzen zwischen Kern- und Außendurchmesser des Gewindes im Vergleich zum mittleren Bolzendurchmesser gering sind.

Unterschiede sind bei verschiedenen Bolzengrößen insofern vorhanden, als bei den Normalgewinden, wie Whitworthgewinde, die Zahntiefe der kleineren Bolzen gegenüber stärkeren im Verhältnis größer ist. So hat $1/4$" eine Gewindetiefe von 0,813 mm bei 5,537 mm Flankendurchmesser und $1\frac{1}{2}$" eine Gewindetiefe von 2,711 mm bei 35,391 mm Flankendurchmesser, was einem Verhältnis von ca. 0,147 zu 0,077 entspricht. Die Zahntiefe von $1/4$" ist also gegenüber $1\frac{1}{2}$" im Vergleich zu ihren mittleren Durchmessern etwa doppelt so groß. Darnach würde auch die nicht radiale Materialverschiebung kleinerer Bolzen gegenüber größeren stärker ausfallen. Die Eindringsehne der Walzbacke, falls man sie als gradlinig ansieht, ist jedoch bei $1/4$" infolge des kleineren Bolzendurchmessers 4,25 mm gegenüber 19,6 mm bei $1\frac{1}{2}$" breit und damit entsteht ein Verhältnis von 0,669 zu 0,815 bei einem Vergleichsdurchmesser von $r = 1$. Hierdurch wird die aus den Gewindetiefen gefolgerte ungünstigere Verformung der kleineren Durchmesser gegenüber den größeren wieder zum Teil ausgeglichen.

Gewinde-Zahnprofil aus Wachsmasse,
geformt in einem statischen Preßapparat.

Die bereits oben erwähnte Pressung eines Zahnprofils erfolgte in einem entsprechend Abb. 24 ausgebildeten stählernen Kasten. Dieser besteht aus 2 Längs- und 2 Seitenwänden, die mit ersteren verschraubt und durch Prisonstifte fixiert wurden.

Mit den Seitenwänden wurde gleichzeitig an einem Ende des Kastens das Preßprofil A verbunden. Dieses entspricht in seinen Verhältnismaßen einem Normal - Whitworth - Profil von 55^0 mit einer Zahnbreite von 110 mm und einer Zahntiefe von $t = 0{,}96 \times 110 = 105{,}6$ mm, also einer tatsächlichen Höhe des abgerundeten Profils von $t_1 = 0{,}66 \times 105{,}6 = 70{,}4$ mm

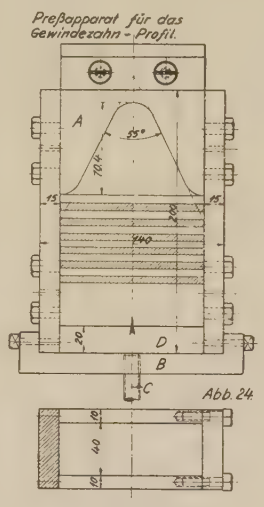


Abb. 24

Das Profil ist herstellungshalber aus zwei Teilen gefertigt, die durch einen eingelassenen Riegel zusammengehalten werden. In diesen Kasten wurde an dem offenen Ende der Block aus der Wachsmasse eingelegt und nach Aufsetzen des Bügels B mit der feingängigen Schraube G gegen das Profil vorgedrückt. Als Druckstück diente eine den lichten Raum des Kastens genau ausfüllende 20 mm starke Eisenplatte D. Ihre Seitenflächen sind ebenso wie die Innenflächen des Kastens geschliffen. Hierdurch wurde eine geringe Reibung des Masseblockes an den Wänden beim Vorschieben erreicht. Die Wände wurden außerdem vor dem Versuche eingeölt.

Der Block wurde in gleicher Weise wie bei den vorhergegangenen Versuchen aus farbigen Schichten von 5 mm Stärke zusammengesetzt. Beim Probepressen trat infolge der durch die Größe des Profils hervorgerufenen bedeutenden Verformungen der Schichten ein teilweises Lösen derselben voneinander an den Stellen der stärksten Materialverschiebungen ein. Besonders war dies in der Mittellinie des Profils der Fall, wo sich der Umkehrpunkt in den Wölbungslinien der Schichten befindet. Um das Lösen der Schichten zu verhindern, wurden beim eigentlichen Preßversuch der Kasten und der Preßblock auf $25—30^0$ vorgewärmt.

Abb. 25, 26, 27, 28, Tafel IV zeigen die Materialverformung in verschiedenen Stadien der Pressung. Das voll ausgepreßte Profil vermittelt jetzt ein klares Bild aller Veränderungen, die die Materialschichten erfahren. Aus ihnen ergibt sich, daß sie ihren inneren Zusammenhang behalten und nur durch Auseinanderziehen oder Verdicken eine aller-

dings zum Teil wesentlich andere Linienführung erhalten. Diese ist hier durch reine Pressung erzielt worden; da sie aber auch für den Walzprozeß als grundlegend betrachtet werden muß, kann auch das Gewinderollen als homogener Verformungsvorgang angesehen werden.

Die am stärksten verformte Schicht ist die äußere Haut des Bolzens. Sie erhält eine bedeutende Längung und weist zugleich die größten Dickenunterschiede auf. Ihre ursprüngliche Länge von 110 mm beträgt fast das Doppelte. Denkt man sich eine horizontale Mittellinie durch das Profil gelegt, so erkennt man, daß die äußere Schicht mit dem größten Teile ihres Volumens nach oben gepreßt und nach unten zu einer dünnen Haut ausgezogen worden ist, die aber eine Verbindung mit den anderen Schichten und um die Rundung des Zahngrundes herum mit den anderen Zahnflanken behält. Am dünnsten ist die Schicht im Zahngrunde und am stärksten in der Zahnspitze, wo offenbar eine Komprimierung durch das von beiden Zahnflanken aufeinander zustrebende und gleichzeitig von innen nach oben gedrängte Material entsteht. Gegenüber der äußeren Schicht sind die zweite und die weiter nach innen zu folgenden Schichten immer weniger stark verformt. Die Spitze der vierten Schicht liegt etwa in Profilmitte. Betrachtet man nur den unter dieser Mittellinie liegenden Teil des Zahnes und sieht von den Erscheinungen im Zahngrunde ab, so ergibt sich eine gegenüber dem Gesamtbilde verhältnismäßig geringe Verformung der Schichten. Die Beachtung des nur halben Gewindezahnes ist insofern gerechtfertigt, als aus englischen und amerikanischen Belastungversuchen von Schraubenverbindungen hervorgegangen ist[1]), daß eine Verringerung der Tragfläche um 50 % die Festigkeit des Gewindes nur um etwa 20 % herabsetzt.

Verfolgt man den fortschreitenden Gang der Verformung anhand der Abbildungen, so sieht man, daß sich die durch die eindringende Profilrundung entstehenden Drücke zunächst nur auf die nähere Umgebung auswirken (Abb. 25). Die Schichten bleiben in ihrer mittleren Partie im wesentlichen noch unverändert. Bei den untersten Schichten tritt jedoch in ihrer Mitte schon eine geringe Wölbung nach oben ein. Die äußere Schicht und die nächsten drei unter ihr liegenden erfahren zu beiden Seiten der Flanken eine kleine Ausbeulung. Beim nächsten Bild haben sich die angebahnten Verformungen verstärkt: an den Flanken und in der Rundung hat der Druckbereich zugenommen und das Material ist weiter mit nach unten gezogen worden. Gleichzeitig hat das Hochwölben in der Mitte weiter auf die oberen Schichten übergegriffen und sich bei den unteren entsprechend verstärkt. Das Ausbeulen der äußeren Schicht an den Flanken ist nicht größer geworden und bleibt auch weiterhin bis zur vollen Auspressung gering. Die Fertigverformung des Profils erfolgt unter weiterer Ausprägung der eingeleiteten Bewegungen und ohne neue Verformungserscheinungen. Das Hochwölben der Schichten in der Mitte und das gleichzeitig sich weiter verstärkende Herunterziehen des Materials durch dieFlanken gibt schließlich auch den oberen Schichten in der Mitte endgültig eine nach unten offene Wölbung.

In den Abb. 29, 30, 31, Tafel V ist ein zweiter Profil-Preßversuch wiedergegeben, bei dem eine absichtlich ungleichmäßige Verformung herbeigeführt wurde. Sie soll einen Vergleich für Vorgänge gestatten, wie sie bei unkorrektem Rollen wahrscheinlich auch auftreten werden. Die künstliche Störung wurde dadurch bewirkt, daß statt der genau abgepaßten und sich an den Seitenflächen des Kastens parallel führenden Druckplatte eine solche geringerer Breite verwendet wurde, die sich bei einseitiger Druckgebung schiefstellen mußte. Wie ersichtlich, tritt dadurch ein einseitig stärkeres Herauspressen der Masse ein, das zur fehlerhaften Ausbildung der Zahnspitze führt. Das Schließen derselben durch Verbinden der einseitig überpreßten Flanke mit dem Material der anderen erfolgt nicht in der Mitte des Profils, sondern durch Überlappen, also nicht im inneren Zusammenhang der Masseteilchen.

Untersuchung von gerollten Stahlbolzen.

Zum Vergleich der Materialverformung des gerollten Bolzens aus Wachsmasse mit den tatsächlichen Vorgängen im Eisen wurde ein Bolzen von 1 ¼" Durchmesser aus weichem Flußstahl auf der Gewinderollmaschine korrekt gewalzt und von ihm durch einen Achsenschnitt ein Profilbild des Gewindes gewonnen. Für diesen Bolzen wurde ein stärkeres Material von 60 mm Durchmesser verwendet, das auf den Walzdurchmesser heruntergedreht wurde, da bei Flußeisen die Sehnenbildung in der Seigerungszone deutlicher erkennbar ist. Die seigerungsfreie Schicht ging dadurch verloren und es blieb nur das geseigerte Kernmaterial übrig. Das nach Oberhoffer makroskopisch geätzte Schliffbild ist in Abb. 32, Tafel VI in starker Vergrößerung wiedergegeben. Man erkennt eine den Versuchen sehr ähnliche Wölbung der Phosphoradern in das Zahnprofil hinein. Diese Verformung ist bis etwa zur Mitte des Zahnes, im Gewindegrunde und bei den weiter innen liegenden Schichten besonders deutlich sichtbar. Nach der Zahnspitze zu ist die Zeilenstruktur des Mittelprofils infolge der hier stärkeren Verformung nicht mehr klar hervorgetreten. Es geht jedoch aus den angrenzenden Profilen hervor, daß sich die Schichten vom Zahngrunde bis zur Spitze linienförmig hinaufziehen und demnach der Zahn homogen gebildet wird. Die eigentliche Bogung der Phosphorlinien ist nicht scharf ausgeprägt, da natürlich die Seigerungszone keine gleichmäßig starken und parallel zueinander laufenden Schichten bildet. Die besonders wenig geseigerte Ader, die weiß hervortritt, ist den Wölbungslinien der vorhergehenden Versuche am ähnlichsten. Sie hat auch die große Verdickung in der Mitte des Profils und stärker werdende Schwächung nach dem rechten Zahngrunde zu. Im linken Zahngrunde verschwindet sie ganz, was auf Materialverschiebungen zurückzuführen sein kann, wie sie die obigen Versuche mit Wachsmasse ergaben. Die Umgrenzung des Zahnes durch die äußere Haut zeigt sowohl im linken Zahngrunde an der rechten Flanke, wie auch an der rechten Flanke des Mittelzahnes kurz vor der Rundung kleine Stö-

[1]) A. A. Sturdee, Engg. 113, 761, 1922.
G. M. Demming, Mech. Engg. 45, 583, 1923.

rungen durch Wölben der Oberfläche. Diese sind wahrscheinlich auf Zerreißen des hier sehr stark verformten Materials zurückzuführen, denn es ist zu beachten, daß die geseigerte Kernzone des Eisens nicht die Zähigkeit des seigerungsfreien Materials besitzt, sondern spröder ist. Beim normalen Gewinderollprozeß tritt ein Reißen der Oberfläche im allgemeinen nicht auf. Die Tiefenwirkung der Walzdrücke in das innere Material hinein, die auch bei den obigen Versuchen beobachtet wurde, ist nicht bedeutend und dürfte maximal bis 0,5 der Zahntiefe betragen.

In Abb. 33, Tafel VI ist bei zwei anderen Zähnen desselben Bolzens die Zeilenstruktur der Phosphoradern nach dem Kern zu besonders deutlich zu erkennen. Abb. 34, Tafel IV gibt eine Reihe von Zähnen eines gewalzten, konischen Bolzens wieder, an dem man das Hochfließen des Materials beim allmählichen Herauswalzen in den Zahn verfolgen kann. Die beiden voll ausgewalzten Zähne sind in Abb. 35, Tafel IV vergrößert zu sehen. Die Phosphoradern erscheinen in diesen Aufnahmen infolge schräger Beleuchtung dunkel. Die Verzerrung der Ferritkristalle beim Walzen geht aus den Mikroaufnahmen, v = 100, eines Zahnes hervor. Abb. 36, Tafel VI ist die Zahnspitze, Abb. 37 ein Stück aus der Mitte der Zahnflanke und Abb. 38 der Zahngrund. Gegenüber dem unverformten Bolzenmaterial, wie es in Abb. 39 zu sehen ist, das etwa um Zahntiefe weiter innerhalb aufgenommen wurde, ist die Verzerrung der Kristallkörner im Zahngrunde am stärksten. Diese sind in die Breite gezogen und liegen in Schichten parallel zur Rundung. In der Zahnspitze dagegen sind die Kristalle senkrecht zur Bolzenachse lang gezogen und bestätigen die Erscheinungen der plastischen Versuche, daß hier durch die Flanken ein beiderseits nach der Mitte zu erfolgendes Zusammenpressen des Materials stattfindet. Ferner tritt auch die Wölbung der Phosphoradern gleichlaufend mit der Rundung der Zahnspitze bei dieser mikroskopischen Ätzung deutlich hervor. Die Zahnflankenaufnahme läßt ebenfalls den Verlauf der Schichten erkennen, die sich wie bei der plastischen Verformung von den Flanken aus nach der Mitte des Zahnes zu hochwölben. Ein Vergleich mit der Verformung des Materials bei dem Preßversuch beweist die Gleichartigkeit der Wölbung und des Überziehens der einzelnen Adern nach der Flanke zu.

III. Untersuchung der volumetrischen Materialverdrängung beim Rollen mit geradlinig ansteigenden Backen.

Die plastische Materialverformung ist mit einem bestimmten Arbeitsverbrauch verbunden. Dieser ergibt sich beim Gewinderollen aus der benötigten Vorschubkraft für den beweglichen Schlitten und dem Rollwege über der festen Walzbacke und ist durch die Tourenzahl der Maschine zeitlich festgelegt. Der Vorschubwiderstand des Schlittens entsteht — abgesehen von den Leerlaufeigenschaften der Maschine — durch die beim Verformen des Gewindes auftretenden Preßdrücke, die auf die Gegendruckflächen des laufenden Schlittens wirken und seinen Reibungswiderstand erhöhen. Da beim Einrollen des Gewindes die Zahnrillen infolge der Wölbung der Walzbacken und ihrer schrägen Zustellung ansteigend verlaufen, treten diese Verformungsdrücke nicht rein senkrecht zur Bewegungsrichtung des Schlittens auf, sondern sind zum geringen Teil direkt entgegengesetzt zur Vorschubrichtung. Aus beiden setzt sich der durch den Verformungswiderstand entstehende tatsächliche Preßdruck zusammen.

Der Walzdruckverlauf beim Einrollen des Gewindes über der Walzbacke ließe sich aus dem Arbeitsbedarf für einen bestimmten Einrollweg und Einwalztiefe ermitteln, falls es möglich wäre, diesen anhand einer Theorie der bildsamen Verformung mathematisch zu erfassen. Trotz vieler Versuche ist es jedoch noch nicht gelungen, eine allgemein giltige Theorie aufzustellen, da die sich hierbei bietenden Schwierigkeiten infolge der Kompliziertheit der Vorgänge eine einwandfreie, alle Umstände berücksichtigende Formulierung nicht gestatten.

Für den Fall des ebenen Problems ist von St. Venant [1]) ein System von Gleichungen aufgestellt worden, deren vollständige Integration jedoch noch nicht geglückt ist. Die bei einer mathematischen Behandlung auftretenden Schwierigkeiten beginnen schon bei der Begriffsfestlegung für das strömende plastische Material. Es wird heute als teils elastischer Körper mit bestimmter Elastizitätsgrenze und teils als inkompressible, zähe Flüssigkeit betrachtet. Diese Auffassung ist durch die teilweise nur elastische Verformung eines unter Kraftwirkungen stehenden Körpers begründet, die bis zu den Stellen vorhanden ist, wo das eigentliche Fließen beginnt. An diesen ist die Grenzzug- oder Druckspannung des Materials überschritten. Diese Grenzspannung muß als unveränderliche Größe mit einem mittleren Werte in die Rechnung eingesetzt werden, obwohl sie bei der Kaltverformung infolge der Verfestigungserscheinungen während der Verformung zunimmt. Die Bezeichnung des fließenden plastischen Materials als zähe Flüssigkeit ist eine Annahme, die gestattet, die für eine solche bereits aufgestellten Gleichungen zu benutzen. Die Inkompressibilität kann allerdings für Metalle auch bei weitgehender Verformung mit großer Genauigkeit angenommen werden.

Ferner ist die Abhängigkeit der Verformungsarbeit von der Geschwindigkeit noch nicht genügend

[1]) de Saint-Venant, sur l'établissement des équations des mouvements intérieurs . . . Comptes rendus, 70 S. 1323, Journal des mathém., 2. Serie, 16 (1871) S. 308, 373.

geklärt. Aus Versuchen [1]) scheint sowohl eine Abhängigkeit bei Warm- als auch bei Kaltverformung hervorzugehen, indem mit zunehmender Geschwindigkeit auch die Verformungsarbeit wächst. Das ist wahrscheinlich, da die Gesetze für die Verformung bildsamer Körper bei gewöhnlichen wie bei höheren Temperaturen Geltung haben müßten. Jedoch ist diese Abhängigkeit bei Kaltverformung heute noch umstritten. [2]) Ungewiß ist vor allem die Größe der Abhängigkeit bei hohen und niederen Temperaturen. Bei niederen Temperaturen scheint sie geringer zu sein, indem bei mit der Geschwindigkeit zunehmendem Verformungswiderstande sich dieser weniger erhöhen würde.

Beim Gewinderollen schwanken die Geschwindigkeiten infolge der Kurbelbewegung — es gibt allerdings auch Gewinderollmaschinen mit Kulissenantrieb — entsprechend der Formel:

$$c = R \cdot \left(\sin \alpha + \frac{1}{2} \frac{R}{L} \sin 2\alpha \right) \frac{\delta \alpha}{dt} \text{ cm/sek.}$$

von 0 bis zum Größtwert und nehmen dann wieder auf 0 ab. Während des Einrollweges findet also ein etwa sinusförmiges Ansteigen der Geschwindigkeit statt. Unter obiger Voraussetzung würde zu Anfang der Preßdruck kleiner sein und der Geschwindigkeit entsprechend zunehmen, falls stets gleiche Volumina in gleicher Zeit zur Verdrängung gelangen. Ein solcher Verlauf des Walzdrucks wäre insofern günstig, als dadurch eine zu plötzliche Stoßbelastung der Maschine und des Werkzeugs beim Erfassen des Bolzens vermieden wird. Der Einfluß der Geschwindigkeit dürfte indessen bei den hier infrage kommenden Geschwindigkeiten nicht von großer Bedeutung sein. Bei einer mathematischen Behandlung der Verformung muß weiterhin angenommen werden, daß die Zustandsänderung isotherm verläuft. Das ist bei Kaltverformung und besonders beim Gewinderollen nicht der Fall, da starke Erwärmungen auftreten, die nach Beobachtungen von W. Reichel [3]) bis gegen 180° betragen. Der Arbeitsbedarf sinkt im übrigen bei Temperaturerhöhung, wie die Untersuchungen von F. Sauerwald und H. Giersberg [4]) und von H. Hennecke [5]) ergaben.

[1]) Fr. Riedel: Über die Grundlagen zur Ermittlung des Arbeitsbedarfs beim Schmieden unter der Presse. Forschungsarbeiten, Heft 141 VDI-Verlag, 1915.

Fr. Körber und H. Müller: Die Verfestigung metallischer Werkstoffe beim Zug- und Druckversuch. Mitt. a. d. K. W. I. f. E. Düsseldorf, 8 (1926). Lieferung 12. Abh. 71.

E. Beckmann: Hammer und Presse, Leipzig, A. Hoffmann 1912.

G. Liss: Die Nutzarbeit des Walzvorganges, St. u. E. 42, (1922) S. 689, 735, 768, 806, 891.

E. Siebel: Untersuchungen über die bildsame Formänderung unter besonderer Berücksichtigung des Schmiedens, Maschbau 2 (1923) S. 307.

[2]) J. Geller: Der Einfluß der Drehzahl auf die Werkzeugtemperaturen in Kaltpressen, Hannover 1927. Helwingsche Verlagsbuchhandlung.

[3]) W. Reichel: Experimentelle und rechnerische Untersuchung einer Gewinderollmaschine, Doktor-Diss. 1930.

[4]) F. Sauerwald und H. Giersberg: Über Warm- und Kaltverformung der Metalle, Zentralbl. d. Hütten- und Walzwerke. 30 (1926) S. 501, 525.

[5]) H. Hennecke: Warmtauchversuche mit perlitischen, martensitischen und austenitischen Stählen, Bericht 94 d. Werkstoffausschusses d. V. D. Eisenh., Düsseldorf.

Die Massenträgheitskräfte ferner können unter Annahme eines verhältnismäßig langsamen Bewegungsvorganges vernachlässigt werden. Beim Gewinderollen dürfte das Außerachtlassen der Massenkräfte berechtigt sein, da die Preßgeschwindigkeit nicht bedeutend ist. —

Ferner muß ein ununterbrochener Verlauf des Strömungsvorganges zugrundegelegt werden. Dieser ist beim Gewinderollen insofern nicht vorhanden, als immer nur ein kleiner Teil des Bolzenumfanges, der sich im Augenblick gerade unter dem Backendruck befindet, der Verformung unterliegt. —

Schwer zu erfassen ist endlich der Koeffizient der inneren Reibung, dessen Wert aus bisherigen Versuchen sehr verschieden ermittelt wurde.

Aus diesen Darlegungen dürfte hervorgehen, daß eine rein mathematische Ermittlung plastischer Verformungen selbst bei geometrisch einfachen Körpern kaum mit großer Genauigkeit möglich ist. In einigen Fällen, wie z. B. beim Kaltstauchen eines runden Bolzenkopfes auf Kaltpressen [6]) und beim Ausfließen von plastischem Material aus einem Zylinder [7]) wurde sie unter der vereinfachenden Annahme von Rotationssymmetrie durchgeführt. Beim Gewinderollen findet eine ebene d. h. in diesem Falle im Achsialschnitt allein sich auswirkende Verformung nach den obigen Untersuchungen nicht statt und gestattet daher auch die Verwendung der aufgestellten Formeln nicht. Die komplizierten Vorgänge der Verformung im Zahnprofil und die bei dem Tiefereindringen des Bolzens sich stets ergebende Änderung der Preßdruckfläche dürften einer rechnerischen Erfassung des Arbeitsbedarfs schwer zuzuführen sein.

Es wird daher in folgendem der Walzdruckverlauf anhand von Walzbacken bekannter Kurvenformen empirisch ermittelt und nachfolgend untersucht. Unter ihrer Berücksichtigung und unter Zugrundelegung der volumetrischen Materialverdrängung beim Einrollen des Zahnprofils werden Walzbackenkurven für verschiedenartigen Druckverlauf entwickelt.

Rechnerische Ermittlung der Volumenverdrängung beim Einrollen des Zahnprofils.

Denkt man sich einen Bolzen über eine Walzbacke mit ebener Rollfläche und Gewinderillen einer bestimmten Profilgröße für Whitworthgewinde so rollend, daß dieser proportional dem Rollwege tiefer eindringt, so erkennt man, daß die Materialverdrängung im Bolzen nicht gleichmäßig zunimmt sondern immer mehr ansteigt. Der Grund hierfür ist durch die geometrische Form des Zahnprofils als Dreieck gegeben. Geht man zunächst von dem spitzen Zahnprofil aus, ohne die normale Abrundung zu berücksichtigen, so erfolgt eine quadratische Zunahme der eindringenden Dreiecksfläche mit zunehmender Eindringtiefe entsprechend Gleichung (Abb. 40)

$$\text{I.} \quad F = t \cdot \frac{a}{2} = t \cdot t \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = t^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot$$

[6]) J. Geller: Der Einfluß der Drehzahl auf die Werkzeugtemperaturen in Kaltpressen. Hannover 1927.

[7]) P. Unckel: Über die Fließbewegung im plastischen Material. Berlin 1928, Springer.

Hiernach nimmt die durch das Dreieck-Profil erfolgende Flächenverdrängung parabolisch zu. Die Eindringtiefe der Zahnrillen geht beim Gewinderollen etwa bis zur Mitte des Profils, da dann die Zahnlücken im Bolzen schon von dem verdrängten Material ausgefüllt sind. Hier sei davon abgesehen, daß infolge der Materialverdrängung auf einen größeren Durchmesser des Bolzens ein tatsächlich etwas tieferes Eindringen erfolgen muß.

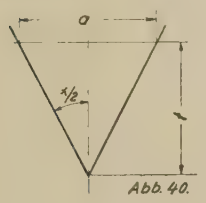


Abb. 40.

Dringt nun das Dreieck-Profil bis zur Hälfte in das Material ein, so ist nach obiger Gleichung erst

$$\text{II} \qquad F = t^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{t_1^2}{4} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

oder ein Viertel der ganzen Dreieckfläche verdrängt. Daraus ergibt sich, daß auch beim Gewinderollen nur ca $1/4$ des das Gewinde ausfüllenden Volumens durch eigentliche Materialverdrängung entsteht.

Der Flächenzuwachs in der Zahnlücke des Bolzens durch die verdrängte Zahnfläche ergibt einen Anstieg nach der Formel: (Abb. 41)

$$\delta h \cdot \frac{\delta t}{2} = (1-\delta) \cdot h \cdot x - x^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

$$= (1-\delta) \cdot h \cdot x - x^2 \frac{h}{2t}$$

$$\delta^2 \cdot \frac{t}{2} = (1-\delta) \cdot x - \frac{x^2}{2t}$$

$$\delta^2 \cdot t^2 = 2t \cdot (1-\delta) \cdot x + x^2 = 0$$

$$\text{III} \qquad x = t \cdot (1-\delta) \pm \sqrt{t^2 \cdot (1-\delta)^2 - \delta^2 t^2}$$

d. h. der Materialanstieg am Bolzen, der sich in der Zunahme des Außendurchmessers bemerkbar macht, erfolgt auch quadratisch zur Eindringtiefe t des Dreieck-Profils, jedoch bedeutend langsamer als die Flächenverdrängung. Abb. 42 zeigt sowohl die Zunahme der Endringfläche des Dreieck-Profils als auch die Zunahme des Bolzendurchmessers über der Eindringtiefe für das spitze Profil von $1\,1/4$" und läßt den Unterschied der Kurven gut erkennen. In Abb. 5, Tafel I, ist der erst langsam u. dann stärker zunehmende Anstieg des Bolzendurchmessers an dem konisch gedrehten und in der Gewinde-Rollmaschine gerollten Bolzen deutlich festzustellen.

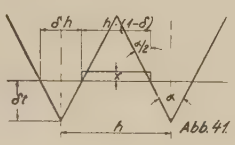


Abb. 41

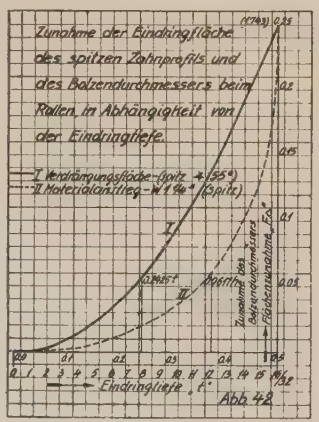


Abb. 42

Das Whitworth-Normalprofil hat jedoch eine beiderseitige Abrundung an den Zahnspitzen, die je $1/6$ der Höhe des Dreiecks beträgt. Abb. 43. Dadurch entsteht beim Eindringen des Zahnes zunächst

Zoll	$1/2$	$3/4$	1	$1\,1/4$
$\frac{t}{2}$	1,016	1,220	1,525	1,743
$\frac{t}{3}$	0,677	0,814	1,016	1,162
$\frac{t}{6}$	0,339	0,407	0,508	0,581
h_B	0,157	0,188	0,235	0,268

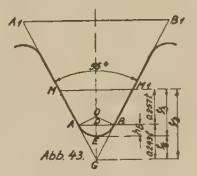


Abb. 43.

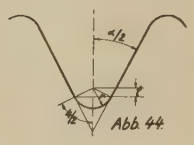


Abb. 44

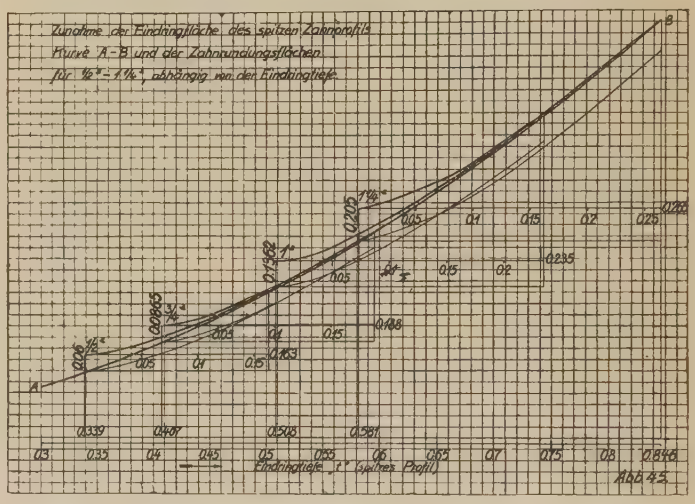


Abb. 45

eine der Rundung entsprechende Materialverdrängung bis zum Übergang dieser Rundung in die Dreiecksform und dann eine solche nach der jetzt übrig bleibenden Form eines Trapezes. Diese folgt der Gleichung:

$$\text{IV} \qquad F = t \cdot a + t^2 \cdot \operatorname{tg} \cdot \frac{\alpha}{2}$$

wobei a die Anfangsbreite A B bedeutet. Die Fläche der Abrundung in Abhängigkeit von der Sehnenhöhe oder Eindringtiefe folgt der Gleichung des Kreisabschnittes:

$$F = r^2 \cdot \frac{\varphi}{2} - r^2 \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2}$$

$$t = r \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right); \quad \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{r-t}{r}$$

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \sqrt{1 - \left(\frac{r-t}{r}\right)^2}$$

$$\frac{\varphi}{2} = \arccos \frac{r-t}{r}$$

$$\text{V} \qquad F = r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-t}{r}\right) - r^2 \left(\frac{r-t}{r}\right) \cdot \sqrt{1-\left(\frac{r-t}{r}\right)^2}$$

Geschieht das Einrollen des Gewindeprofils nun in der Weise, daß nach einem bestimmten Wege,

z. B. einer halben Umdrehung des Bolzens das Gewinde ausgewalzt ist, so kann man das Volumen des hierbei verdrängten Materials unter der Voraussetzung proportionalen Einrollens durch Integration von IV und V nach t ermitteln. Hierbei sind als Grenzen die entsprechenden Anfangs- und Endwerte einzusetzen, wie sie sich nach Abb. 43 ergeben. Also z. B. für 1 1/4" bei der Rundung O und 0,268 und beim Trapezteil O und 1,162 — 0,268 ≅ 0,9. Da jedoch das Einrollen nicht über diesem Wege, sondern über dem mittleren Rollwege stattfindet, muß ein Korrektionsfaktor A eingeführt werden, der den längeren Weg proportionaliter berücksichtigt. Für diesen gilt $A = R \cdot \varphi \cdot \frac{1}{t\,max}$, wobei R = mittlerer Bolzenradius, t max = gesamte Eindringtiefe, φ im Bogenmaß. Es ist also im Falle einer halben Umdrehung $A = R \cdot \pi \cdot \frac{1}{t\,max}$.

Für Gleichung IV ergibt sich dann bei 1 1/4 Whitw.:

$$\boldsymbol{v}_{Trapez} = \int_0^t \left(t \cdot \boldsymbol{a} + t^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right) dt$$

$$\text{VI} \quad = A \cdot \left(\frac{t^2}{2} \cdot \boldsymbol{a} + \frac{t^3}{3} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right) \Big|_0^t$$

$$= R \cdot \pi \cdot \frac{1}{1{,}162} \cdot \left(\frac{0{,}9^2}{2} \cdot \boldsymbol{a} + \frac{0{,}9^3}{3} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right) \cdot$$

$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \operatorname{tg}\ 27^0\ 30' = 0{,}174$, $\boldsymbol{a} = 0{,}883$.

Für Gleichung V ergibt sich:

$$\boldsymbol{v}_R = \int_0^t r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-t}{r}\right) \cdot dt -$$

$$\int_0^t r^2 \cdot \left(\frac{r-t}{r}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-t}{r}\right)^2} \cdot dt;$$

nun ist:

$$\int \arccos x \cdot \delta x = x \cdot \arccos x - \sqrt{1-x^2};$$

setzt man $\frac{r-t}{r} = x$; $dx = -\frac{dt}{r}$

so ist:

$$\int_0^t r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-t}{r}\right) dt = -r^3 \int_0^{\frac{r-t}{r}} \arccos x \cdot dx$$

oder, wenn man $\frac{t}{r} = \vartheta$ setzt

$$= -r^3 \cdot (1-\vartheta) \cdot \arccos(1-\vartheta) - \sqrt{2\vartheta - \vartheta^2}.$$

Ferner ist:

$$\int_0^t \left(\frac{r-t}{r}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-t}{r}\right)^2} = \int_0^t (1-\vartheta) \cdot \sqrt{1 - (1-\vartheta)^2}$$

setzt man $1-\vartheta = x$, so ist:

$$\int_0^{1-\vartheta} x \cdot \sqrt{(1-x)^2} \cdot dx = -\frac{1}{3}(1-x^2)^{3/2} \Big|_0^{1-\vartheta}$$

$$= \frac{x^2}{3}\sqrt{1-x^2} - \frac{1}{3}\sqrt{1-x^2} \Big|_0^{1-\vartheta}$$

mithin:

$$r^2 \cdot \int_0^t \frac{r-t}{r} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-t}{r}\right)^2} \cdot dt =$$

$$-\frac{r^3}{3}\left[(1-\vartheta)^2 \cdot \sqrt{2\vartheta - \vartheta^2} - \sqrt{2\vartheta - \vartheta^2}\right]$$

$$= -\frac{r^3}{3}\left[(\vartheta^2 - 2\vartheta) \cdot \sqrt{2\vartheta - \vartheta^2}\right]$$

und insgesamt

$$\text{VII}\ \boldsymbol{v}_{Rundung} = A \cdot r^3 \cdot \left[\sqrt{2\vartheta - \vartheta^2} \cdot \left(1 + \frac{2\vartheta - \vartheta^2}{3}\right) - (1-\vartheta) \arccos(1-\vartheta)\right]$$

Der Einfluß der Rundung für das verdrängte Volumen läßt sich anhand seiner Fläche gegenüber der des Profils bis zur halben Eindringtiefe vergleichen: es ist für 1 1/4" $J_{Trapez} = 1{,}209$ mm² und $J_{Rundung} = 0{,}169$ mm², also der Flächenanteil der Rundung an der ganzen Fläche $= \frac{0{,}169}{1{,}378} = 0{,}1225$.

Abb. 45 gibt einen Überblick über den Flächenanstieg verschiedener Profile von 1/2" bis 1 1/4".

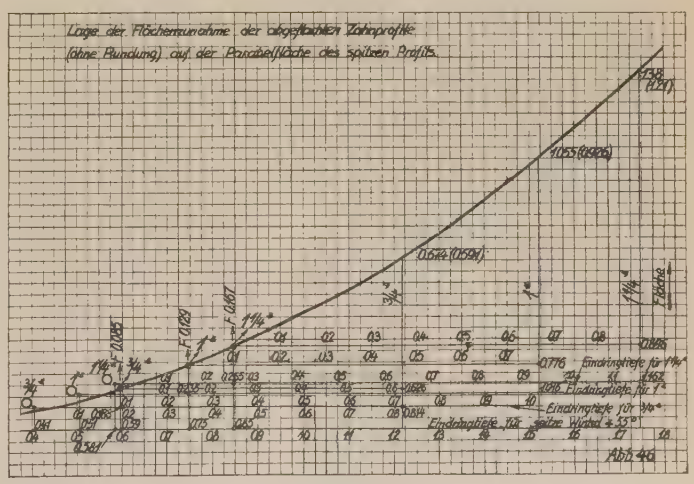


Abb. 46

Als Abszisse ist die Eindringtiefe über dem spitzen Dreieckprofil aufgetragen. Kurve A B gibt als Parabel in ihren Ordinaten ausschnittsweise den Flächenanstieg über dieser Eindringtiefe an. Jedes Ge-

windeprofil beginnt je nach seiner Größe erst in einer Entfernung von seinem Wert t/6 vom Anfangspunkt der Parabel mit einer Flächenzunahme nach Gleichung V und geht nach Ausfüllung seiner Rundungsfläche in die Parabelfläche über. In der Abbildung sind die Eindringtiefen vom Beginn jeder Rundung an bis zum Übergange eingetragen und es ist auch ihre Lage gegenüber den Eindringtiefen des Spitzenprofils angegeben.

In Abb. 46 ist in kleinerem Maßstabe die Flächenzunahme einzelner Profile von dem Punkte an aufgezeichnet, wo sie in die Parabel übergegangen sind, also der Trapezteil der Dreiecksfläche beginnt. Dabei ist die Eindringtiefe jetzt von diesem Punkte ab bis zur halben Profiltiefe $\frac{t}{2}$, und auch vor dem Ausgangspunkte ihrer Rundung an gerechnet. Der Beginn der Rundung ist durch einen kleinen Kreis markiert. Gleichzeitig sind ihre Eindringtiefen gegen-

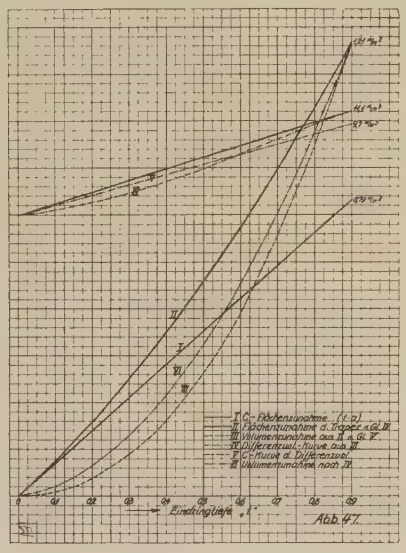


Abb. 47

über der des spitzen Profils angegeben. Für 1 ¼" ergibt sich demnach eine Trapez-Eindringtiefe von 0,896, eine Gesamt-Eindringtiefe von 1,162 und eine von der Spitze des Dreiecks an gerechnete Eindringtiefe von 1,745 mm. Die Fläche beträgt für diese Eindringtiefen 1,21 bzw. 1,38 bzw. 1,58 mm².

Für 1 ¼" ist in Abb. 47 der Flächenzuwachs des trapezförmigen Teils noch in größerem Maßstabe aufgetragen. Kurve II zeigt diesen Flächenanstieg. Kurve I gibt vergleichsweise den proportionalen Flächenanstieg an und läßt dadurch den Einfluß des Faktors $t^2 \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}$ in Gl. IV mit zunehmender Eindringtiefe gut erkennen. Kurve III stellt die Volumenverdrängung bei proportionalem Eindringen als kubische Kurve nach Gleichung VI und im Vergleich zu Kurve II dar.

Für die Beurteilung des Druckverlaufs ist es notwendig, zu wissen, wie große Volumina hierbei von Schritt zu Schritt des Einrollens zur Verdrängung kommen. Deshalb sind in Kurve IV die Differenz-Volumina aus Kurve III über der Eindringtiefe angegeben. Aus ihr ergeben sich unter Beachtung der stark ausgezogenen Verbindungslinie ihre beiden Endpunkte, daß die beim proportionalen Eindringen der Zahnrillen für jeden Schritt des Rollweges oder gleichen Drehungswinkel zur Verdrängung kommenden Volumina einen erst schnelleren und dann verlangsamt ansteigenden Verlauf haben. Es wird daher hiernach der Walzdruck infolge der immer größeren Materialmenge, die bei jeder gleichen Teildrehung zu verpressen ist, mit zunehmender Eindringtiefe ansteigen. Die besonderen Erscheinungen der plastischen Materialverformung werden hier aus den oben angegebenen Gründen nicht berücksichtigt und es muß auch zunächst vorausgesetzt werden, daß die Walzdruckfläche (Walzphase) stets gleich groß bleibt.

Kurve VI zeigt eine Volumenverdrängung für proportional ansteigende Differenz-Volumina, wie sie in K. V als proportional ansteigende Linie eingetragen sind. Der Vergleich zwischen Kurve III und VI lehrt, daß letztere schneller ansteigt. Sie ist eine arithmetische Reihe zweiter Ordnung: jedes dem ersten folgende Glied ist hier gleich der Summe der vorhergehenden Glieder plus einem Zuwachs, der vom ersten Gliede beginnt, und proportional mit dem ersten Gliede ansteigt. Ihr Vorteil liegt darin, daß das größte Differenz-Volumen geringer ist als bei der Kurve des proportionalen Eindringens und zwar nur 9,3 mm³ gegenüber 11,1 mm³ beträgt. Entwickelt man daher die Eindringkurve der Walzbacke nach K. V, so wird bei proportionaler Zunahme der Differenzvolumina gegenüber K. IV zu Anfang ein größeres Volumen und von ca. 0,6 mm Eindringtiefe an, wo sich die Kurven IV und V überschneiden, ein geringeres Volumen je Teildrehung verdrängt. Dadurch entsteht gegenüber der proportional eindringenden Walzbacke ein zu Beginn größerer Druckanstieg, der jedoch proportional erfolgt und dessen Größtwert kleiner bleibt. Der größte auftretende Druck über der Walzbacke wird dadurch also verringert. Die Einrollkurve steigt zu Anfang stärker an und verläuft allmählich flacher. Im übrigen ergibt sich nach K. III, daß im Endpunkte des Einwalzens des Profils ein plötzlicher Druckabfall eintreten muß, weil beim weiteren Rollen nur noch die Ausgleichsvolumina zu verpressen sind.

IV. Theoretische Entwicklung von Einrollkurven für bestimmte Materialverdrängung und Einrollwege.

Unter Zugrundelegung der aus obigen Gleichungen für proportional zunehmende Eindringtiefe ermittelten Verdrängungsvolumina wurde nun der Gesamtvolumenverlauf für Walzbacken mit verschieden langem Einrollwege aufgestellt. Hierfür wurden Wege von ¼, ½, 1 und 2 Umdrehungen des Bolzens gewählt. Abb. 48 und 49 zeigen die Volumenkurven und ihre Entwicklung. Hierbei sind

folgende Erscheinungen des Gewinderollens berücksichtigt worden: Nach jeder halben Umdrehung kommt der durch jede der beiden Walzbacken gerollte halbe Bolzenumfang in den Druckbereich der anderen. Nimmt daher die Eindringtiefe proportional weiter zu, so ist zu beachten, daß von den

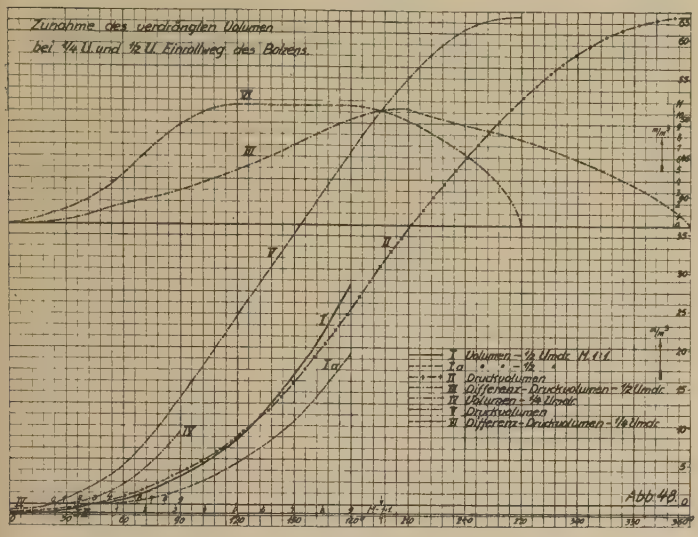


Abb. 48

rechnerisch anhand der vorhergehenden Kurven und Gleichungen ermittelten Verdrängungsvolumina das bereits vorgewalzte Volumen abgezogen werden muß, will man beim weiteren Einrollen nur die neu zu verpressenden Volumina erfassen, die für den Walzdruck in Frage kommen. Ferner wurden oben die Volumina für die Rundung und das Trapezteil

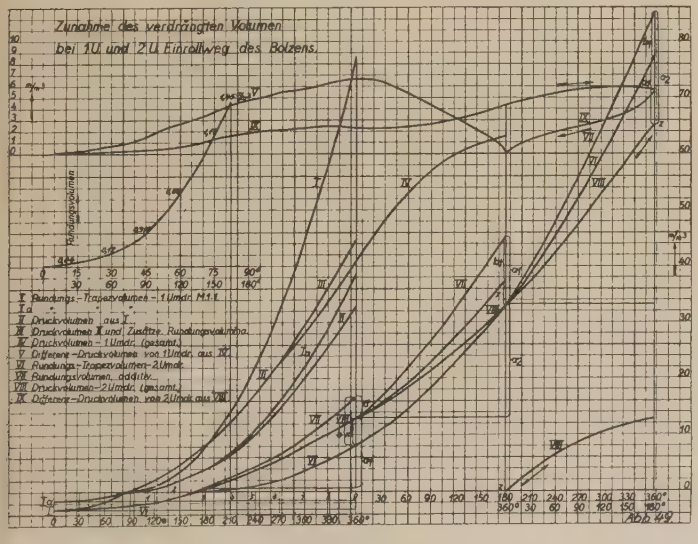
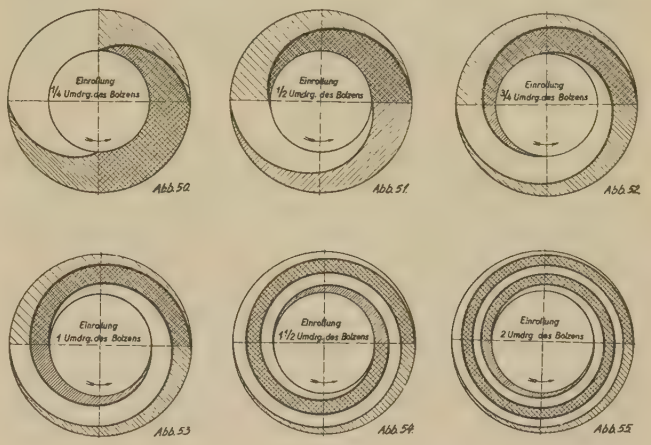


Abb. 49

getrennt behandelt. Im Verlauf des Rollens jedoch addieren sich stets die Volumina beider. Nach Erreichen der vollen Eindringtiefe ist endlich das Einrollen des Gewindes noch nicht beendet, sondern es verbleibt noch das Restvolumen des ja unrund eingerollten Bolzens. Dieses ist nach einer weiteren halben Umdrehung fertiggepreßt. Abgesehen sei dabei von elastischen Nachwirkungen des Bolzenmaterials, die hier später durch die Ausbildung des weiteren Kurvenverlaufs erfaßt werden.

Die obige Erscheinung des Weiterwalzens eines vorgepreßten Bolzenumfangs durch die andere Walzbacke verdeutlichen die Abb. 50 bis 55 für 1/4 bis 2 Umdrehungen. Das proportionale Eindringen ist hier durch eine archimedische Spiral-



kurve wiedergegeben. Den beiden Walzbacken entsprechend sind stets 2 Eindringwege angenommen: bei 1/4 Umdrehung (Abb. 50) hat das Einrollen nach dieser Umdrehung des Bolzens die größte Tiefe erreicht. Während dieser 1/4 Umdrehung steigt also der Druck wie oben ermittelt an. Beim Weiterrollen bleibt der Druck konstant, da von beiden Walzbacken die maximalen Volumina, die sich aus der größten Eindringtiefe ergeben, zu verpressen sind. Bei einem so kurzen Einrollweg, der kleiner als eine halbe Umdrehung ist, werden stets die überhaupt maximalen Walzdrücke des betreffenden Profils auftreten. Nach einer halben Umdrehung ist das Einrollen des Gewindes noch nicht beendet, sondern es gelangt noch das durch hellere Schraffierung gekennzeichnete erst im Einrollen vorgepreßte Stück des Bolzenumfangs zum vollen Auswalzen. Der Vorpressung entsprechend wird der Walzdruck hier abnehmen.

Bei 1/2 **Umdrehung,** Abb. 51, ist mit Beendigung der halben Umdrehung die größte Eindringtiefe erreicht. Die zweite Walzbacke übernimmt den jeweils vorgepreßten Bolzenumfang und rollt während der zweiten halben Umdrehung den Bolzen voll aus. Die Druckabnahme ist wieder durch den heller schraffierten Teil gekennzeichnet. Auch hier tritt der maximale Walzdruck auf, falls nicht durch andere Ausbildung des Einrollweges entsprechend Kurve V, (Abb. 43) die Endvolumina und damit der maximale Preßdruck verringert werden.

Bei 3/4 **Umdrehung,** Abb. 52, ist nach einer halben Umdrehung noch nicht die volle Eindringtiefe erreicht. Es übernimmt jetzt die andere Backe das weitere Einrollen auf der nächsten 1/4 Umdrehung, auf der bereits ein Vorwalzen stattgefunden hat. Jetzt bedarf es noch einer weiteren halben Umdrehung, um den Bolzen rund auszuwalzen. Für den Druckabfall durch das vorgepreßte Volumen ist wieder das heller schraffierte Stück maßgebend.

Während der letzten 1/4 Umdrehung bleibt nur sehr wenig Material zu verdrängen. Im übrigen ist anhand der Abbildung 52 ersichtlich, daß bei einem Einrollen des Gewindes auf 3/4 Umfang des Bolzens der maximale Walzdruck nicht mehr auftritt.

Bei **1 Umdrehung** und weiterhin bis **2 Umdrehungen** überlagern sich die Erscheinugen immer mehr und es wird hierdurch ein weiterer Abfall des Walzdruckes bedingt. Diesen Schemata entsprechend sind die Volumen-Druckkurven der Abb. 48 und 49 aufgestellt.

Für 1/4 **Umdrehung** stellt Kurve 4 das Rundungs- und Trapez-Volumen dar. Vom Übergang der Rundung an in den Trapezteil addieren sich die Rundungsvolumina zu den Trapezvolumina bis zur ersten 1/4 Umdrehung = 90°. Von 90° bis 180° steigt das Volumen gradlinig an. Es ergibt sich hier als reines Produkt der Profilfläche mal dem Rollwege. Von 180° — 270° addieren sich die Restvolumina als Differenz, wie in Abb. 50 gezeigt. Bei 270° ist das Gesamtvolumen verdrängt. Dieses beträgt für $1^1/_4$" z. B. je Walzbacke $1{,}38 \cdot \pi \cdot r = 1{,}38 \cdot \pi \cdot 14{,}70 = 63{,}5\ mm^3$.

Kurve I gibt den Volumenanstieg für 1/2 **Umdrehung** und Kurve I a diesen auf den Maßstab der Kurve V reduziert an. Mit Beginn des Übergangs der Rundung in den Trapezteil, nach einem Winkel von 42°, tritt wieder die Addition des Rundungs- und Trapezvolumens ein. Von 180° — 360° folgen die Restvolumina. K. II und V erreichen bei 360° bzw. 270° dieselbe Höhe. In den Kurven VI und III sind die Differenzvolumina angegeben, die für den Walzdruck maßgebend sind. Nach K. VI steigt das Volumen oder der ihm entsprechende Druck bogenförmig bis 90° an, bleibt bis 180° konstant und fällt erst langsam und dann schneller werdend bis 270° ab. Bei K. III geht der mehrfach gebogte Volumenanstieg bis 180° und fällt dann langsam bis 360°.

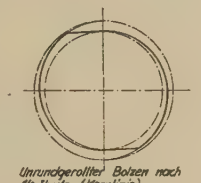
Für **1 Umdrehung** des Bolzens zum Einrollen des Profils stellt K. I in Abb. 49 den reinen Volumenanstieg dar. In K. I a ist dieser auf den rechts angegebenen Maßstab reduziert. Nach 180° Umdrehung treten die Überlagerungen auf, so daß von hier ab das Walzdruckvolumen absinkt und unter Addition der nur hinzukommenden Restvolumina nach K. II ansteigt. Hierzu treten von 90° ab die Rundungsvolumina, die proportional zunehmen und dem Volumenanstieg einen Verlauf nach K. III geben. Auch diese überlagern sich nach einer halben Umdrehung und der Druck-Volumenanstieg folgt daher hinter 270° der K. IV. Von 360° ab gelangen die Restvolumina zur Verpressung und nach einer weiteren 1/2 Umdrehung des Bolzens ist das Einrollen des Gewindes beendet.

Bei einem Einrollwege von **2 Umdrehungen** des Bolzens ist das vollkommene Einrollen wieder erst nach einer weiteren halben Umdrehung, also nach insgesamt 2 1/2 Umdrehungen erfolgt. Der halbe Bolzenweg ergibt sich aus dem doppelten Angriff zweier Werkzeuge bezw. Walzbacken beim Gewinderollen und muß immer noch durchlaufen werden, wenn vor Beginn dieser halben Umdrehung bereits die größte Eindringtiefe des Profils erreicht war, um ein volles Auswalzen des Gewindes zu erhalten. Dieses war auch bei dem Einrollweg von 1/4 Umdrehung der Fall, nur daß hier von 90° bis 180° Drehung das Einrollen in voller Eindringtiefe vor sich geht und infolgedessen von 180° bis 270° Drehung nur noch die Restvolumina verdrängt werden. Wahrscheinlich ist allerdings, daß die Ungenauigkeiten des Bolzens infolge der Rückfederung des während des Rollens zum Teil in elastischer Spannung gehaltenen Material bei einem so kurzen Einrollwege größer ausfallen als bei einem längeren Einrollwege.

Die Ermittlung der K. VIII erfolgte in gleicher Weise wie bei den vorhergehenden Kurven: das Ausgangsvolumen ist K. VI, deren erster Teil bis 164° Drehung wieder das Rundungsvolumen angibt, während von 164° bis 2×360° Drehung das Trapezvolumen folgt. Von 164° ab addiert sich das volle Rundungsvolumen zu K. VI, so daß K. VII entsteht, die bis 360° ansteigt und deren Zuwachs mit b bezeichnet ist. Gleichzeitig überlagert sich das Einrollvolumen der Rundung von 0° bis 164° und von 164° bis 180° das proportional ansteigende Gesamtrundungsvolumen, so daß K. VII um das bei 180° erreichte Volumen, welches mit a bezeichnet ist, abfällt und nur ein Additionsvolumen x zu K. VI übrigbleibt. Es ergibt sich dann bei 360° das Volumen der K. VIII als a_1. Von 360° Drehung bis wieder 180° würde zunächst K. VIII entsprechend K. VI weiter ansteigen. Es ist deshalb dieser Teil der K. VI in die Höhe der K. VIII, also um die Differenz x, nach oben gerückt. Zu dem jetzt bei 540° erreichten Volumen addiert sich wieder das Rundungsvolumen von 180° bis 360° mit b 1 und gleichzeitig subtrahiert sich das bis 360° erreichte Volumen a_1, so daß das tatsächliche Druck-Volumen nach dem eingezeichneten Teil der K. VIII verläuft. In gleicher Weise steigt dieses Volumen weiter bis 360°. Von 360° bis wieder 180° kommen die Restvolumina zur Verpressung. Dieser Teil der K. VIII ist in Abb. 45 rechts unten aufgetragen. Er zeigt, daß das Volumen nur noch wenig zunimmt. In Abb. 45 ist oberhalb noch der Druckverlauf entsprechend den Differenzvolumina als Kurven für 1 und 2 Umdrehungen aufgetragen. Darnach erhält der Walzdruck über der Walzbacke bei länger werdenden Einrollwegen infolge der vielfachen Überlagerungen einen zunehmend wellenförmigen Verlauf, der für den Walzvorgang sowie für Werkzeug und Maschine als Nachteil angesehen werden muß. Um diese Druckschwankungen zu vermeiden, müßte entweder ein kürzerer Einrollweg gewählt werden, der aber zu einer Druckerhöhung führt, oder es müßte der Walzbacke eine diese Schwankungen berücksichtigende Kurvenform gegeben werden. Aus den Kurven VI, III, V und IX der Abb. 48 und 49 ist im übrigen der Höchstdruck-Abfall bei zunehdem Einrollwege ersichtlich. Die Druckabnahme auf der letzten halben Umdrehung des Bolzens scheint bei dem Einrollweg von einer Umdrehung am günstigsten zu sein. Hierdurch würde eine größere Rundheit des Bolzens wahrscheinlich sein.

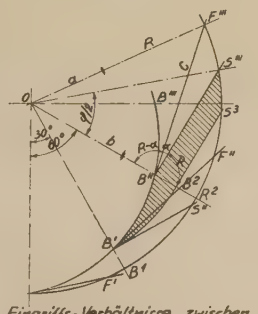
V. Untersuchung der Walzdruckfläche.

Beim Einrollen des Gewindes in einen Bolzen mit proportional tiefer eindringenden Backen beschreiben die Spitzen ihrer Zahnrillen im Querschnitt des Bolzen eine archimedische Spirallinie. Geschieht das Eindringen der Zahnspitzen bis zur größten Tiefe während einer halben Umdrehung des Bolzens, so entstehen Eindringlinien entsprechend nebenstehender Skizze. Abb. 56. Am Ende der halben Drehung ist demnach ein unrunder Körper vorhanden, dessen Umfang durch die beiden Spirallinien und zwei tangential anschließende Gerade als Übergang gekennzeichnet ist. Dieser Übergang wird durch die geraden Zahnrillenlinien der Walzbacke als Walzphase gebildet. Diese wächst hierbei von O bis zu einem Größtwert, der als Sehne zu der größten Eindringtiefe des Profils bzw. zu den sich bildenden Kreisabschnitten zu errechnen ist. Die Walzphase verläuft immer tangential an die Einwalzkurve des Bolzens, also hier die archimedische Spirale und steht um den Anstiegwinkel dieser Kurve schräg zur Senkrechten des Bolzendurchmessers.



Unrundgerollter Bolzen nach ½ Umdr. (Hernline) Abb. 56.

Betrachtet man diese Vorgänge am Bolzen in verschiedenen Stadien der Drehung nach Abb. 57, so sind die inbezug auf die Umfangslinie des Bolzens ansteigenden Spirallinien O' B' B'' B''', die Walzphasen O' F', B' F'', B'' F''' usw. und der Anstiegwinkel F'' B' S''. Dieser Winkel entspricht dem Anstieg der Walzbacke und beträgt z. B. bei 1 ¼" und der halben Zahntiefe von 1,162 mm bei einem halben Bolzenumfang $\pi \cdot 14{,}75$



Eingriffs-Verhältnisse zwischen Bolzen u. Walzbacke. Entstehung der Walzphase. Abb. 57.

$$\operatorname{tg} \frac{1{,}162}{14{,}75} = 1^{0}\ 30'.$$

Er kann bei den folgenden Untersuchungen vernachlässigt werden. Die Verhältnisse sind in Abb. 57 übertrieben gezeichnet.

Bei einer Teildrehung des Bolzens von 30° auf 60° vom Beginn des Rollens gerechnet, gelangt z. B. das Stück F''' B'' B' S'' oder unter Außerachtlassung des sehr kleinen Windeldreiecks F''' B'' S''' das Stück S''' B'' B'; S''; des Bolzenquerschnitts zur Verformung. Dieses Stück kann man sich zusammengesetzt denken aus der Fläche S''' B'' B' B_2 S_3 und S_3 B_2 B' S''. Letztere entsteht bei einem Rollen des Bolzens von 30° bis 60° ohne tieferes Einwalzen. B' B_2 läuft also konzentrisch zum Bolzenumfang. Es ist dann S_3 B_2 B' S'' = B_2 B' B_1 $R_2 = {}^{1}/_{12}$ Umfang des Kreisringes.

Durch die Walzphase wird also das Kreisringstück zu einer Figur verzerrt, die als Verformungsdreieck bezeichnet werden kann. Dieses greift stets in den nächsten Teil der Drehung über. Durch das Tiefereinwalzen kommt zu dem Verformungsdreieck ein Zusatzdreieck, das sich aus dem Spiraldreieck B'' B' B_2 und dem trapezartigen Stück S''' B'' B_2 S_3 addiert. B'' S''' ist die gegenüber B_2 S_3 verlängerte Sehne, deren Zuwachs aus dem Tiefereindringen um das Stück B'' B_2 entsteht. Unter Voraussetzung proportionaler Zunahme von B'' B_2 nimmt die Sehne oder aktive Walzphase, wie sie hier genannt werden soll, nach der Formel

$$s = 2\sqrt{h \cdot (2r - h)};\ h = \text{Bogenhöhe, zu.}$$

Gegenüber der vorhergehend ermittelten, rein radialen Volumenverdrängung tritt also noch ein bei jeder Teildrehung zunehmendes Volumen hinzu, das unter Berücksichtigung der Parallelität der beiden Sehnen B'' S''' und B_2 S_3 der quadratischen Flächenzunahme des eindringenden Profils entsprechen, also auch cubisch zunehmen müßte. Hierzu kommt außerdem die Vergrößerung des Winkeldreiecks F''' B'' S''' gegenüber F'' B' S'', dessen Flächenzunahme nach dem Bolzenumfange zu stattfindet und auch ansteigende Volumenzunahme ergibt. Dieser Zunahme der je Teildrehung zu verpressenden Volumina steht die proportionale Vergrößerung der Druckfläche durch das tiefere Eindringen der Walzphase und eine weitere Vergrößerung der Druckfläche durch die Verlängerung der Sehne gegenüber, so daß eine wirkliche Druckerhöhung nur in geringem Maße eintreten dürfte.

Zur Feststellung des tatsächlichen Druckverlaufs wurden nun Walzbacken mit proportional ansteigendem Einrollweg gefertigt und mit diesen Bolzen in der Maschine gerollt, wobei der Druckverlauf aufgezeichnet wurde.

VI. Gewinderollversuche mit Rollbacken von planmäßig erzeugter Kurvenform.

Die Gewinderollbacken werden allgemein auf der Horizontal-Fräsmaschine mit einem Zahnrillenfräser plan eingefräst. Die Fräsmaschine muß eine genügende Starrheit und gute Tischführung besitzen, um genau gerade und glatte, zittermarkenfreie Zahnrillen auf den Walzbacken zu erhalten. Der Fräser hat keine Gewindegänge, sondern parallel zueinander eingedrehte Zahnrillen, deren Abstand der Teilung des zu fräsenden Gewindes und deren Anzahl der Walzbackenbreite

unter Berücksichtigung des in der Steigung erfolgenden Durchganges der Walzbacke unter dem Fräser entspricht.

Das Eindrehen der Zahnrillen in den Fräser geschieht mittels eines strehlerartigen Formstahles. Dieser wird zuerst mit einem Zahnprofil-Stahl als Gewinderolle gedreht und dann in üblicher Weise segmentartig ausgeschnitten, wobei er unterhöht wird. Diese Unterhöhung muß gegeben werden, weil sich die in der Steigung laufenden Gewindegänge im Achsenschnitt nicht mit den Zahnprofil-Rillen paaren, die an dem Fräser erzeugt werden sollen und daher andernfalls eine Profilverzerrung eintreten würde. Bei dem unterhöhten Strehlerstahl kommen die schneidenden Zähne schnell genug aus dem Eingriff mit den Zahnrillen des Werkstücks und es wird auch gleichzeitig durch den sich ergebenden Anstellwinkel ein guter Schnitt erzielt. Die Unterhöhung verlangt andererseits ein korrigiertes Zahnprofil für den Strehler selbst, ebenso wie zu berücksichtigen ist, daß die Zahnrillen-Profile des Walzbackenfräsers der Teilung des Gewindes d. h. dem zur Steigung senkrechten Schnitt entsprechen müssen, weil die Zahnrillen in die Walzbacken in der Steigungsrichtung eingefräst werden.

Um Ungenauigkeiten, die durch die doppelte Profilübertragung auf den Fräser entstehen, und besonders auch durch das Verziehen beim Härten auftreten, zu vermeiden, ist man heute dazu übergegangen, die Zahnrillen nur vorzuarbeiten und nach dem Härten des Fräsers zu schleifen und hinterschleifen. Bei den Versuchswalzbacken wurden korrekt geschliffenen Schnellstahlfräser verwendet. Beim Aufbringen des Fräsers auf die Frässpindel wurde besonders darauf geachtet, daß diese nicht schlägt, da sonst die Walzbacken über ihrer Breite nicht gleichmäßig hoch werden und dann ein konisches Gewinde entsteht. Frässpindel und Bohrung des Fräsers hatten Schiebesitz wodurch ein zentrischer Lauf des Fräsers gegeben war. Zum Fräsen der Backen wurde eine möglichst schwere und neuere Fräsmaschine (L. Loewe, Type 13, Modell II) benutzt, die eine genügende Starrheit und einwandfreie Tischführung besitzt, um genau gerade und ratterfreie Zahnrillen zu erzeugen. Anhand einer Meßuhr wurde festgestellt, daß der Tisch der Maschine beim Durchlaufen unter der Frässpindel mit einer Genauigkeit von 0,015 mm horizontal lief.

Zum Einspannen der Walzbacken auf dem Tisch der Fräsmaschine werden **Vorrichtungen** verwendet, die die Backe in ihrer Lage fixieren und gleichzeitig gestatten, sie im Steigungswinkel des Gewindes zur Senkrechten der Fräserachse einzustellen. Abb. 58 und 59 zeigen eine kleinere u. eine größere Vorrichtung, **Graewe, Lüdenscheid,** die eine solche Einstellung u. durch Keil bewirktes Höherstellen der Walzbacken ermöglichen. Letzteres ist sonst nicht üblich, sondern erfolgt allgemein durch Vertikalverstellung des Tisches der Fräsmaschine, um jede Störung der Einspannung der Walzbacke in der Vorrichtung zu vermeiden. Es ist jedoch dadurch auch eine Verwendung der Vorrichtung auf der Drehbank zum Einfräsen der Walzbacke möglich. Auf diesen Vorrichtungen werden die Walzbacken, wie allgemein üblich, plan eingefräst.

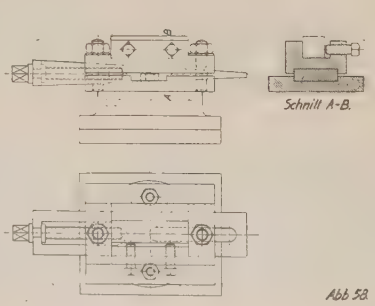


Abb. 58

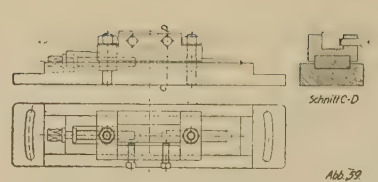


Abb. 59

Da jedoch die durch das Verziehen beim Härten entstehende Wölbung in Verbindung mit einem Anfeilen der Zahnrillen, worüber oben berichtet wurde, besonders bei größeren Bolzendurchmessern nicht genügt, um ein gut gewalztes Gewinde zu erhalten, wurde bereits eine schwenkbare Aufspannvorrichtung hergestellt, **Archimedes, Breslau,** die der Walzbacke beim Fräsen einen Anschnitt gibt. Abb. 60.

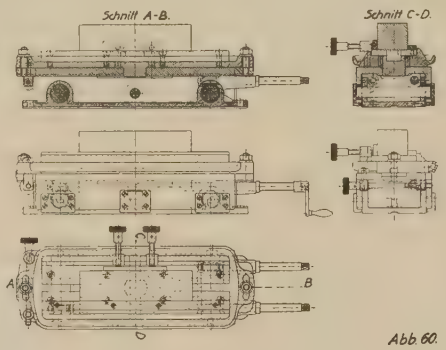


Abb. 60.

Auf dieser Vorrichtung werden die Gewindegänge zunächst plan eingefräst. Danach wird der Tisch um einen unter seiner Mitte liegenden Bolzen nach der einen oder anderen Seite gedreht und der Anschnitt gefräst. Diese Vorrichtung gestattet jedoch seiner Konstruktion nach nur das Fräsen eines Anschnittes bestimmter Länge, der natürlich nicht allen in Frage kommenden Gewindegrößen gerecht werden kann.

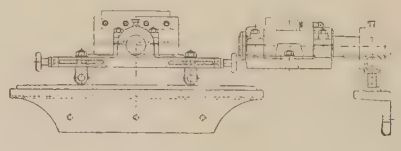


Abb. 61

Auf einer neueren Fräsvorrichtung, **Gebrüder Hilgeland, Ronsdorf,** ist man bereits vom Planeinfräsen der Gewinderillen in Walzbacken abgegangen und gibt ihnen während des Fräsens durch Schwenken des Einspannkastens für die Backe um eine Achse schon eine geringe Vorwölbung. Abb. 61. Diese verstärkt sich beim Härten der Walzbacken durch das Verziehen des Stahles und ersetzt besonders bei größeren Gewindeprofilen das Anfeilen oder Anfräsen der Backen in recht günstiger Weise.

Für den besonderen Zweck der Ermittlung des Walzdruckverlaufs bei Gewinde-Rollbacken mit verschiedenartiger Wölbung der Rollfläche war es

notwendig, den Backen unabhängig vom Verziehen des Stahls beim Härten eine genau bestimmte Kurvenform zu geben. Hierfür mußte eine geeignete Fräsvorrichtung erst geschaffen werden, die gestattete, jede gewünschte Form der Rollkurve während des Fräsens der Zahnrillen mit einer sehr großen Genauigkeit auf die Rollbacken zu übertragen. Zu beachten war hierbei, daß bei der geringen Tiefe des Gewindes die maximale Wölbung der Rollfläche nur sehr klein ist und z. B. bei 1¼" der halben Gewindetiefe mit 1,162 mm entspricht. Differenzen von wenigen Hundertsteln eines

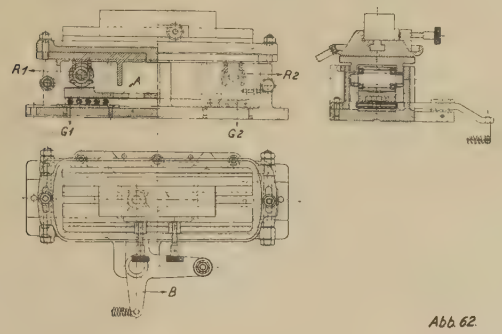


Abb. 62.

Millimeters spielen infolgedessen beim Gewinderollen schon eine bedeutende Rolle. Vom Verfasser wurde daher eine neue Präzisions-Fräsvorrichtung, Abb. 62, entworfen und werkstattgemäß ausgeführt, deren Hauptmerkmale folgende sind:

1. rein vertikales Heben und Senken der Walzbacke ohne Drehung derselben und daher Unabhängigkeit von ihrer Stärke hinsichtlich der auf sie zu übertragenden Fräskurve,
2. doppelte Druckaufnahme des Fräsdrucks auf zwei weit auseinander gelagerten Rollen großen Durchmessers und daher große Starrheit und zittermarkenfreies Fräsen,
3. Uebersetzung der Führungskurve auf die Walzbacke von 1 : 30, wodurch eine billige Herstellung der Führungskurven ermöglicht wird, weil sie eine 30fach vergrößerte Wölbung haben,
4. praktisch erzielte Fräsgenauigkeit 0,02 mm.

Das Heben und Senken des Walzbackentisches der Vorrichtung erfolgt durch Verschieben der Keilplatte A mithilfe des rechtwinkligen Hebels B, an dessen anderem Schenkel eine Rolle sitzt, die an der Kurve läuft. Diese ist vertikal gestellt und am rechten Lagerbock der Frässpindel befestigt. Die Keilplatte ist ein Zwischenglied zwischen dem Walzbackentisch und dem Körper der Vorrichtung und ist auf Rollen gelagert. Sie hat den beiden Druckrollen R_1 und R_2 des Tisches entsprechend zwei Keilflächen mit der Neigung 1 : 30. Der rechtwinklige Hebel ist gleicharmig. Die Druckrollen sind auf Achsen kugelgelagert, die in dem Tisch befestigt sind. Dieser führt sich vertikal in zwei weit auseinander stehenden Prismen an der einen Seitenwand des Vorrichtungskörpers, während die andere ebene Gleitflächen hat. Der Körper ist aus Stahlguß und hat der besseren Bearbeitung halber nur eine angegossene Seitenwand. Die andere ist angeschraubt und nach der Montage durch Paßstifte fixiert. Sie ist außerdem beiderseits durch kräftige Zugstangen gegen ein eventuelles Nachgeben gehalten.

In die Grundplatte des Körpers sind gehärtete und geschliffene Gleitplatten, G_1 und G_2 für die Laufrollen des Keils eingesetzt. Die Laufrollen sind für jeden Druckpunkt in einem Käfig zusammengefaßt. Sie sind im Einsatz gehärtet und geschliffen. Die unteren Laufflächen und seitlichen Führungsflächen des Keils sind geschabt. Seine vordere Keilfläche wurde gehärtet und geschliffen, während als hintere Keilfläche ein gehärteter und geschliffener Keil eingesetzt wurde, der durch eine feingängige Schraube in Längsrichtung verstellt werden kann und erst bei der Montage justiert wird. Hierdurch wurde die Schwierigkeit behoben, die beiden Keilflächen in genauer Achsenentfernung der Druckrollen auf gleiche Höhe zu schleifen. Die Druckrollen sind ebenfalls einsatzgehärtet und geschliffen.

Als Achslager für die Druckrollen dienen rechteckige, gehärtet und geschliffene Steine, die in zueinander genau parallele und zum Tisch rechtwinklige Führungen eingesetzt und verschraubt wurden. Diese Steine wurden nach dem Härten und Ausschleifen ihrer Bohrungen zusammen auf einen Paßdorn gesetzt und gleichzeitig an drei Seiten rechtwinklig geschliffen. Diese geschliffenen Seiten dienten als Anschraubfläche und Paßflächen in der Führung. Hierbei war nur das Paßmaß der Seiten flächen für die Führung an sich wesentlich, während ihr zentrischer Sitz zu der Mitte der Bohrung von geringerer Bedeutung war, weil die Steine in gleicher Lage, wie sie auf dem Dorn geschliffen wurden, auch in die Führung eingesetzt wurden. Durch diese Maßnahmen wurde sowohl genaue Höhenlage, als auch horizontale Parallellage der Druckrollen erreicht. Der Tisch der Vorrichtung trägt ein um seine Mitte drehbares und in Steigungsrichtung des Gewindes einstellbares Oberteil, dessen Aufspannfläche nach Gesamtmontage der Vorrichtung abgeschliffen wurde.

Als **Werkzeugstahl für Gewinderollbacken** wird heute noch meistens reiner Kohlenstoffstahl in Tigelqualität verwendet, der mit genügender Härte eine gewisse Zähigkeit verbindet, die ihrerseits ein Umlegen oder Ausbröckeln der zumal bei kleinen Profilen sehr feinen Zahnspitzen, vermeidet. Der Nachteil dieses reinen C-Stahles oder aber eines nur wenig legierten Stahles liegt, wie bereits eingangs dieser Arbeit erwähnt wurde, darin, daß er sich beim Härten verzieht. Das Verziehen besteht sowohl im Wölben der Backen infolge der Volumenausdehnung beim Abschrecken, als auch häufig in einem gewissen Werfen d. h. Windschiefwerden, das sich selbst bei sorgfältiger Wärmebehandlung nicht immer ganz vermeiden läßt. Dieses tritt besonders auch bei zweiter oder dritter Härtung auf, wenn die Walzbacke nach vorangegangener Arbeitsleistung und nach erfolgtem Ausglühen wieder neu eingefräst ist. Das Verziehen des Werkzeugstahles ist im wesentlichen durch die Wasserhärtung bedingt, die ja die schroffste Art des Abschreckens darstellt. Gegenüber dem Kohlenstoffstahl gestatten

die stärker legierten Stähle das Härten in Öl oder auch in Luft. Hier verbinden sich die günstigen Gefügeeigenschaften mit der milderen Art des Abschreckens und der Stahl verzieht sich in nur sehr geringem Maße.

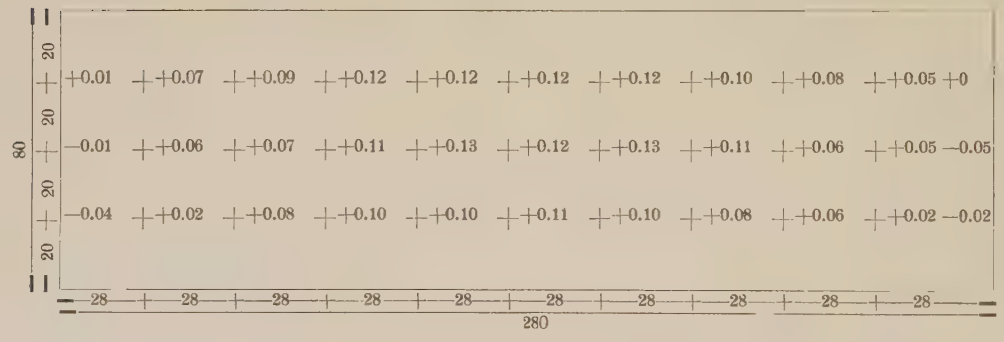
Derartige hochlegierte und zwar auf der Chrombasis aufgebaute Stähle wurden für die folgenden Rollversuche ausprobiert. Der sich dabei auch hinsichtlich seiner Arbeitsleistung günstig verhaltende Stahl wurde dann für die Herstellung der Walzbacken verwendet. DieWärmebehandlung dieser Stähle erfolgte sehr sorgfältig und wurde für jedes Material besonders ermittelt. Sie bestand im wesentlichen in einem sehr langsamen, während etwa 6 Stunden erfolgenden Vorwärmen auf dunkelrot Glut, einem dann schnell und gleichmäßig vorgenommenen Erhitzen auf Härtetemperatur und nachfolgendem Abkühlen in Preßluft. Zur Abkühlung wurde hier eine besondere Düsenanordnung verwendet, die mit einem scharfen und genügend starken Luftstrahl eine sehr gleichmäßige und dabei hinreichend schnelle Abkühlung bewirkte. Die so behandelte Walzbacke aus dem verwendeten Cr.-Stahl zeigte nach dem Härten die ganz geringe Wölbung von max. 0,02 mm.

Abb. 63 und 64 geben das verschieden starke Verziehen einiger Werkzeugstähle wieder. Jede Walzbacke war aus sorgfältig geglühtem und einwandfreien Material hergestellt und allseitig plan geschliffen. Die Güte des Schliffs wurde mit dem 0,001 mm Mikrotast geprüft und ergab bei allen eine Toleranz von ± 0,005 max. Stahl A ist ein reiner C-Stahl. Sein Verziehen beträgt bei der kurzen Backe 0,13 mm max., während er bei der längeren Backe 0,24 mm erreicht. Der Längenunterschied der beiden Backen beträgt nur 40 mm. Es wurde jedoch auch bei anderen Stählen für Wasser, Öl und Lufthärtung öfter beobachtet, daß bei einer geringen Längenänderung ein bedeutend größeres Verziehen auftrat. Dieses hängt mit dem Zusammenwirken der drei Dimensionen zusammen.

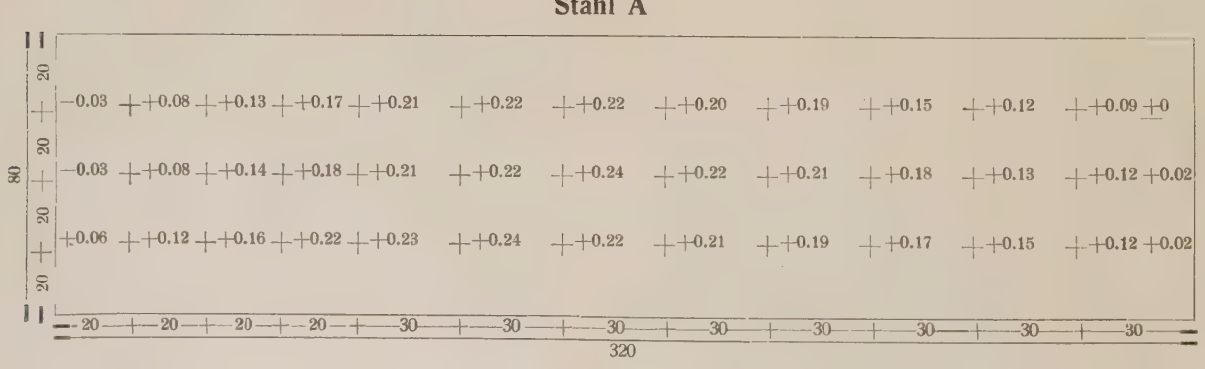
Stähle B, C und D sind Chrom-Stähle mit einem Cr.-Gehalt von 11 bis 13 %. Sie haben sich bedeutend weniger verzogen. Am günstigsten verhalten sich C und D. C ist für Ölhärtung. D ist für Lufthärtung. Der Stahl D wurde für die folgenden Versuche ausgewählt, da er bei mehrfacher Härtung sich gleich günstig verhielt und auch gute Walzleistungen ergab. Alle aus ihm gefertigten Versuchsrollbacken wurden vor dem Fräsen auf der Aufspannfläche plan geschliffen, nach dem Fräsen hinsichtlich der Genauigkeit der eingefrästen Walzkurve mit der Meßuhr geprüft und nach erfolgter Wärmebehandlung nachkontrolliert.

Plangeschliffene Walzbacken nach dem Härten.

Stahl A



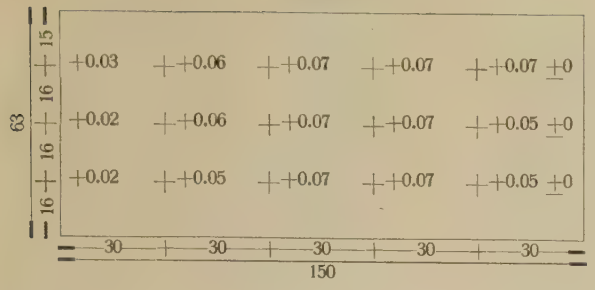
Stahl A



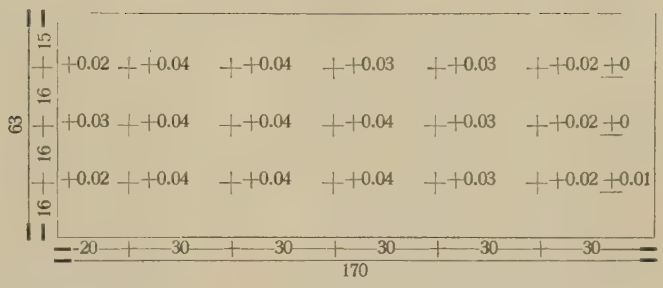
Die Zahlenwerte geben die Abweichung von 0 durch das Verziehen (Wölben) an.

Abb. 63

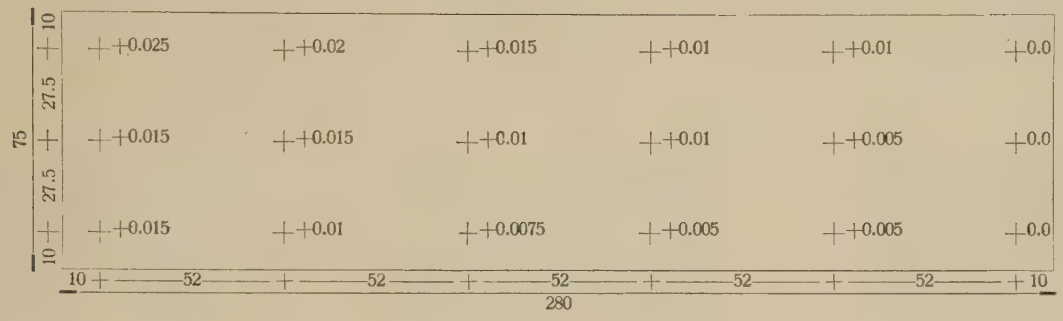
Stahl B



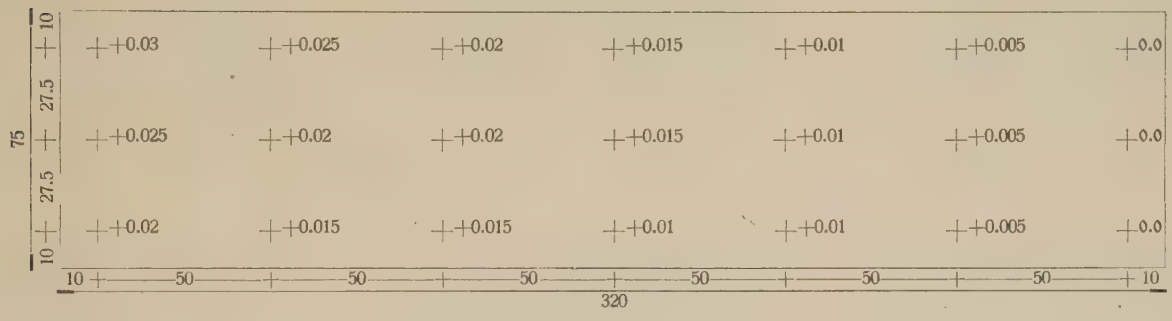
Stahl B



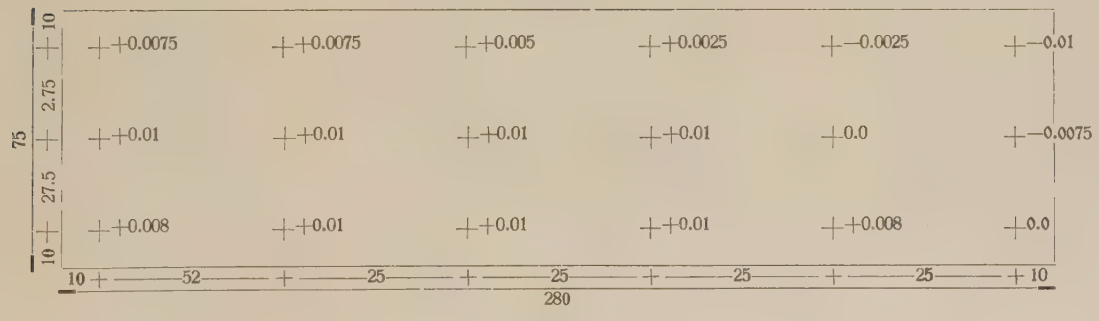
Stahl C



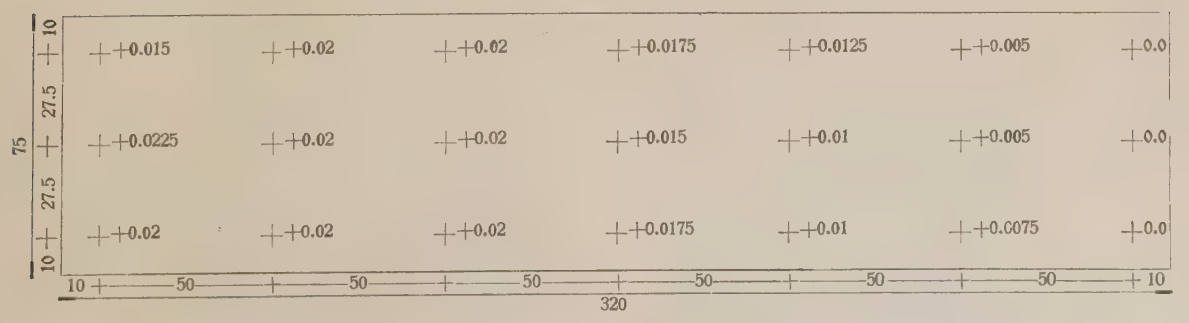
Stahl C



Stahl D



Stahl D



Die Zahlenwerte geben die Abweichung von 0 durch das Verziehen (Wölben) an.

Abb. 64

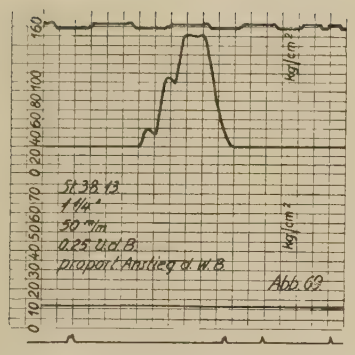


Abb. 69

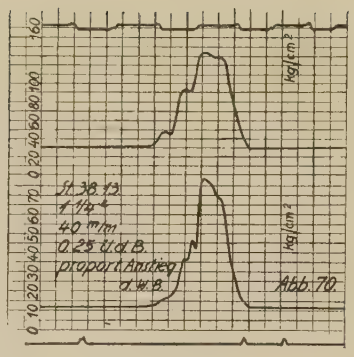


Abb. 70

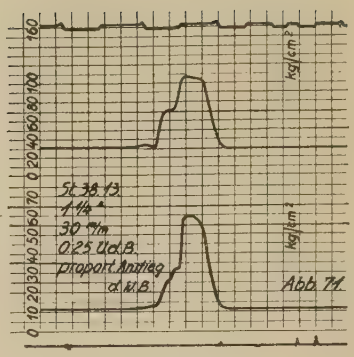


Abb. 71

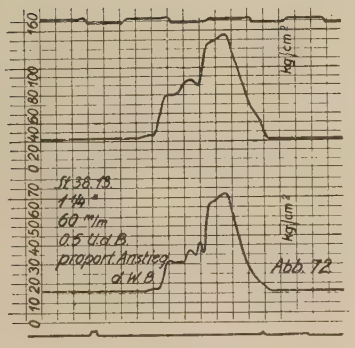


Abb. 72

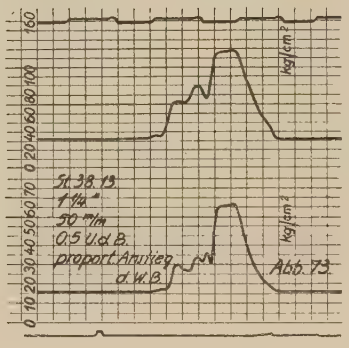


Abb. 73

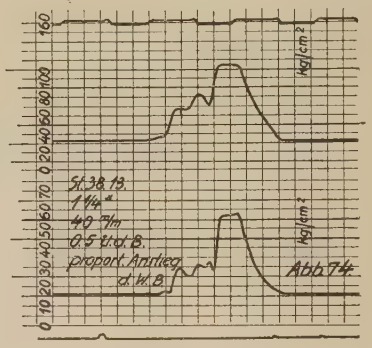


Abb. 74

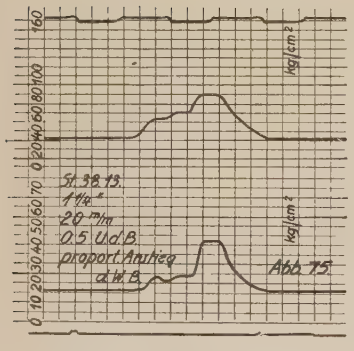


Abb. 75

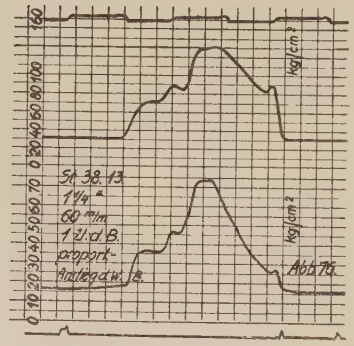


Abb. 76

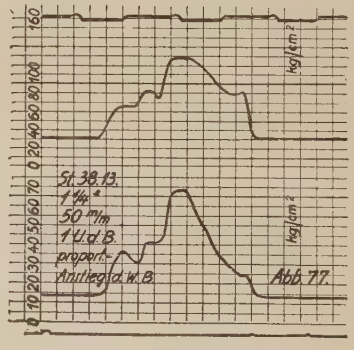


Abb. 77

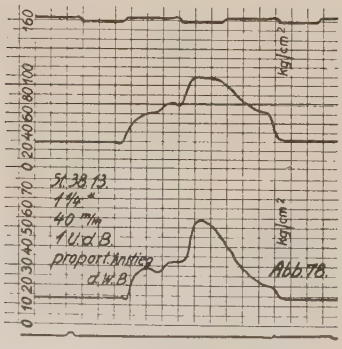


Abb. 78

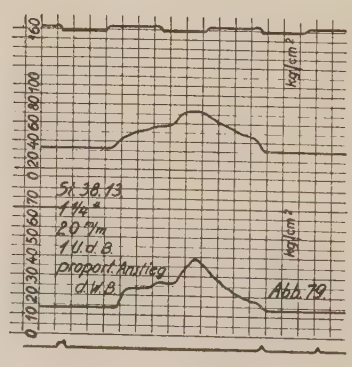
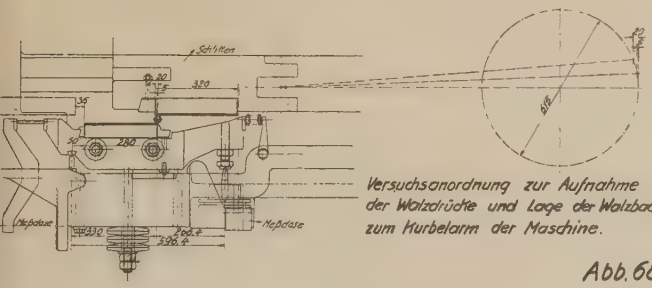


Abb. 79

Walzdruckuntersuchungen.

a) Walzbacken mit geradlinigem Einrollwege.

Auf vorgenannte Weise wurden Versuchswalzbacken mit zunächst proportional ansteigendem, verschieden langem Einrollweg hergestellt. Dieser wurde nach dem Umfang des Bolzens bzw. seines Walzdurchmessers abgestuft und betrug 0,25, 0,5, 1 und 2 mal Bolzenumfang. Abgesehen von dem Anschnitt waren die Backen plan gefräst und hatten am anderen Ende einen zweiten Anschnitt zum Ausrollen des gewalzten Bolzens. Die Übergänge des Anschnitts zu dem horizontalen Teil waren scharfkantig ausgeführt. Entsprechend dieser Form der Walzbacken preßte sich beim Walzen der Bolzen vom Beginn seiner Mitnahme durch die bewegliche Backe während des Laufes auf dem Anschnitt allmählich tiefer in die Gewinderillen ein, hatte die größte Eindringtiefe am Übergang in den horizontalen Teil erreicht und rollte dann parallel zwischen ihnen entlang, bis ihn die zurücktretenden Zähne im schrägen Auslauf freigaben. Zum Gewinderollen wurde eine Gewindewalze mit doppelarmigem Kurbelantrieb benutzt, auf der Gewinde bis 1¼" Whitw. gerollt werden. Abb. 65 und 66, Tafel VII (Archimedeswerk Breslau). Die Walzdrücke wurden an der feststehenden Walzbacke gemessen. Diese war in einem auf Schneiden gelagerten Backenhalter eingespannt, der die Messung des Hauptdrucks und und des Vorschubdrucks gestattete. (Abb. 68). Die Druckübertragung geschah über Druckstelzen auf



Versuchsanordnung zur Aufnahme der Walzdrücke und Lage der Walzbacken zum Kurbelarm der Maschine.

Abb. 68.

Meßdosen und wurde von einem Schreibapparat mit zwei Federn aufgezeichnet. Über Einzelheiten der hierbei benutzten Apparatur siehe W. Reichel[1]). Besonderer Wert wurde bei diesen Versuchen darauf gelegt, daß die Rollbacken mit ihrem plan gefrästen Stück genau parallel zueinander standen, um eine der Walzbackenform wirklich entsprechende Druckaufnahme zu erhalten. Die Gegendruckflächen der festen Walzbacke wurden deshalb zu der der beweglichen genau ausgerichtet. Hierbei mußte die Vorspannung des Backenhalters gegen die Hauptdruckmeßdose auf ca. 30 at. ≅ 2400 kg erhöht werden, da dieser eine geringe elastische Nachgiebigkeit zeigte, die durch diese Vorspannung ausgeglichen wurde. Die Spiralfeder mußte hierfür durch Tellerfedern ersetzt werden, die also infolge der Hebelarmübersetzung eine Spannung von 5000 kg ca. erhielten. Durch Vergleichsmessungen wurde festgestellt, daß eine Beeinträchtigung der Meßdruckaufnahmen hierdurch nicht eintrat. Durch die stärkere Vorspannung des Backenhalters gegen die Meßdose wurde gleichzeitig ein gewisses geringes Spiel unwirksam gemacht, das besonders bei der eingesetzten, verstellbaren Drehpunktschneide und dem einstellbaren Gewinde-Zwischenstück zwischen Support und Druckstelze der Hauptdruckmeßdose festgestellt worden war. Der Druckkolben der Meßdose trat bei maximalem Druckbereich um 0,07 mm nach der Membrane zu zurück. Diese Differenz wurde jedoch selbst bei dem kürzesten Anschnitt von 0,25 Umdrehungen nur zu 75 % ausgenutzt und bei den Backen mit besonderer Kurvenform nur zu 60 % max. Hierbei war das Drehpunkt-Übersetzungsverhältnis bereits mindestens 1 : 3, so daß ein Nachgeben der Walzbacke an der Druckstelle mit nur 0,02 mm ca. zur Auswirkung kam. Die Genauigkeit entspricht also derjenigen für die Herstellung der Backe selbst.

Die **Einspannung der festen Backe** erfolgte so, daß das Übersetzungsverhältnis der Hebelarme Meßdose-Drehpunkt zu Einwalzende der Backe-Drehpunkt stets gleich blieb. Die Backen waren daher nicht wie sonst der Einspannung halber mit keilschrägen Stirnflächen, sondern rechteckig ausgeführt und waren stets gleich lang. Eine einseitig schräge Keilschraube spannte die Backe gegen die linke Druckfläche fest. In gleicher Weise wurde die bewegliche Walzbacke eingespannt. Die Länge der Backen betrug 320 bzw. 280 mm. Die Zuführung für den Bolzen wurde stets so eingestellt, daß die mitnehmende Backe, die also 40 mm länger war, bereits 20 mm vorgeeilt war, bevor der Bolzen auf der festen Backe zu rollen begann. Die 20 mm langen Flächen am Anfang und Ende der Backen, die in gleicher Abschrägung wie der Einrollweg und der Auslauf gefräst waren, dienten der leichteren Mitnahme bzw. dem guten Auswerfen des Bolzens. Die Einspannung der Backe im Schlitten ergab im übrigen eine Überdeckung der festen Backe um 5 mm im Totpunkte, mithin 15 mm Hub bei Beginn des Rollens. Hierdurch war auch der Druckbeginn im Druckdiagramm und Zeitweg-Diagramm festgelegt. Die Druckaufnahme erfolgte im Schreibgerät mit gleichförmiger Geschwindigkeit. Beginn und Ende des Walzhubes sowie der Zeitbedarf wurden durch Kontaktgeber markiert. Die Diagramme wurden mit Hilfe der Zeit-Weg-Linie unter Berücksichtigung der den gleichen Laufzeiten entsprechenden Schlittenstellungen umgezeichnet und hieraus das eigentliche Druckdiagramm im Hebelverhältnis des Meßdrucks ermittelt. Alle Eigenarten der Kurven wurden bei dieser Umzeichnung berücksichtigt. Die Vorschubdruck-Diagramme bedurften nur der Umzeichnung nach den Hubstellungen, da das Hebelverhältnis auf die Meßdose 1 : 1 beträgt.

Abbildungen 69 bis 83 zeigen verkleinert die Original-Druckdiagramme, die beim Rollen von 1¼" Gewinde auf den **Walzbacken mit 0,25, 0,5, 1 und 2 Umdrehungen Einrollweg** aufgenommen wurden. Diese sind in Abb. 84—87 auf die Zeit-

[1]) W. Reichel: Experimentelle und rechnerische Untersuchung einer Gewinderollmaschine. Dr.-Diss. 1930.

weg-Abszisse umgezeichnet und nach dem Hebelverhältnis übertragen.

1. **Bei einem Einrollwege von 0,25 Bolzenumfang** = 23 mm konnte nur bis 50 mm Länge gewalzt werden, da schon hierbei eine unsichere Mitnahme des Bolzens eintrat und die Gefahr bestand, daß er bei verspätetem Einrollen nicht ausgeworfen wurde, sondern zwischen den Backen hängen blieb und sie beim Rückgang der Maschine zerstörte. Der Hauptdruck erreichte bei 50 mm fast 160 kg/cm² in der Meßdose und damit die Grenze der Belastungsmöglichkeit der Schreibfeder. Der Vorschubdruck konnte aus gleichem Grunde nur bis 40 mm aufgenommen werden. Die Diagrammkurven (Abb. 69—71 für 30, 40 und 50 mm zeigen bei dem kurzen Einrollweg eine sehr schnelle Druckzunahme und einen starken Druckabfall nach Erreichen des größten Meßdrucks. Die Druckanstiegslinien haben bei Erreichen des höchsten Punktes eine starke Knickung, von der ab sie nahezu horizontal laufen. Der Knickpunkt kennzeichnet den Übergang des Backenanschnitts in seinem parallelen Teil. Hier müßte die maximale Eindringtiefe der Zahnrillen in das Bolzenmaterial erreicht sein und der Druck nun bis zur halben Umdrehung konstant sein, da gleiche Materialverpressung erfolgen. Tatsächlich ist der Höchstdruck an der Umbiegung der Drucklinie nicht erreicht, wie aus den rektifizierten Walzdruckkurven (Abb. 84) hervorgeht, sondern steigt bei der Hauptdruckkurve dahinter noch langsam an. Dieser Anstieg geht bis 0,75 Umdrehung des Bolzens, wo dieser entsprechend Abb. 50 auf den ganzen Umfang eingerollt ist. Mithin kann die verlangte Eindringtiefe der Zahnrillen nach 0,25 Umdrehung noch nicht erreicht gewesen sein und die volle Auswalzung des Gewindeprofils trat erst nach der $^3/_4$ Drehung des Bolzens ein.

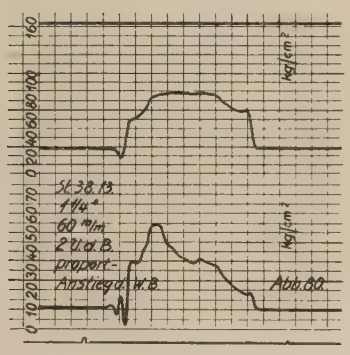


Abb. 80

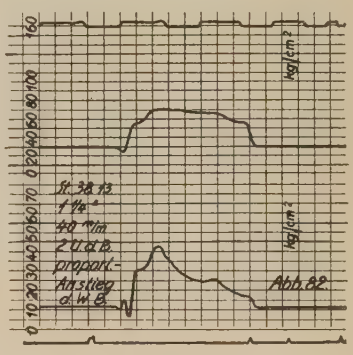


Abb. 82

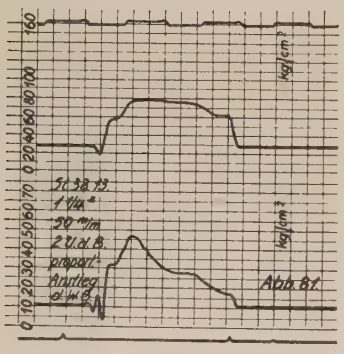


Abb. 81

Diese Erscheinung muß aus einer Vergrößerung der Backenentfernung erklärt werden, die bei der starken Pressung durch die teilweise Verdrängung des Ölfilms zwischen dem laufenden Schlitten und seiner Gegendruckbahn und einem **elastischen Nachgeben des Maschinenständers** entsteht. Der erzeugte Preßdruck entspricht dadurch zunächst nicht ganz dem Druck, der bei einer starren Maschine auftreten würde und erreicht erst bei Eintritt einer gewissen Stabilität seinen effektiven Wert. Bei abnehmender Verformungsarbeit liegt er als federnder Druck auf dem Walzmaterial und ist höher als dieses eigentlich bedingt. Die Aufweitung der hier benutzten Maschine beträgt ca. 0,2 mm max. (s. W. Reichel) und machte statt des eigentlichen Flankendurchmessers eine Engerstellung der Backen notwendig. Daher lastet auch nach erfolgtem Einrollen des Profils während des Nachrollens noch ein bedeutender Druck auf dem Bolzen, der erst mit dem Zurückweichen der Zahnrillen im Auslauf abfällt. Dieser Federungsdruck geht deutlich aus den Diagrammen für 0,25 bis 2 Umdrehungen hervor. Bei länger werdendem Einrollweg konnte der Abstand der Rollbacken vergrößert, d. h. dem eigentlichen Flankendurchmesser genähert werden und ergab doch ein gut ausgewalztes Gewinde.

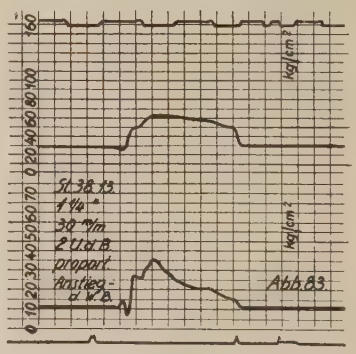


Abb. 83

Damit mußte auch der Federungsdruck abnehmen, ebenso wie der Vorschubdruck, der dem Hauptdruck ähnliche Tendenz hat, heruntergeht. Die Verringerung ist aber nur so groß, wie der verkleinerten Aufweitung des Maschinenständers bei dem verminderten Walzdruck entspricht, der durch den größeren Einrollweg entsteht.

Ein gewisser Nachrolldruck ergibt sich abgesehen von der Maschinenfederung, auch durch die elastischen Nachspannugen des Materials im Bolzen. Diese üben in Verbindung mit der ersteren einen weiter verformenden Einfluß auf den Bolzen aus. Mit ihm hängt daher auch die Toleranz des Flankendurchmessers d. h. die Rundheit des Gewindes zusammen, die nur dann innerhalb gewisser Grenzen wird gehalten werden können, wenn die Ablösung des Druckes genügend langsam und gleichmäßig erfolgt. Beim Rollen größerer Gewindeprofile werden insbesondere die Zahnrillen den rollenden Bolzen nur allmählich freigeben dürfen. Hierfür ist ein pro-

portionales Zurückweichen durch einen Anschnitt wenig geeignet, da bei der zur Verfügung stehenden Auslauflänge ein zu plötzlicher Druckabfall eintritt. Dieses ist bei den Backen für 0,25 Umdrehung vorhanden (Abb. 69), obwohl der Auslauf eine Länge

möglichst lang sein, um den Druckausgleich über den Bolzenumfang auszudehnen. Derartige Auslaufkurven wurden bei den folgenden Versuchen ausprobiert und führten zu günstigerem Druckabfall und fast voller Ausnutzung der Walzbacken. In der

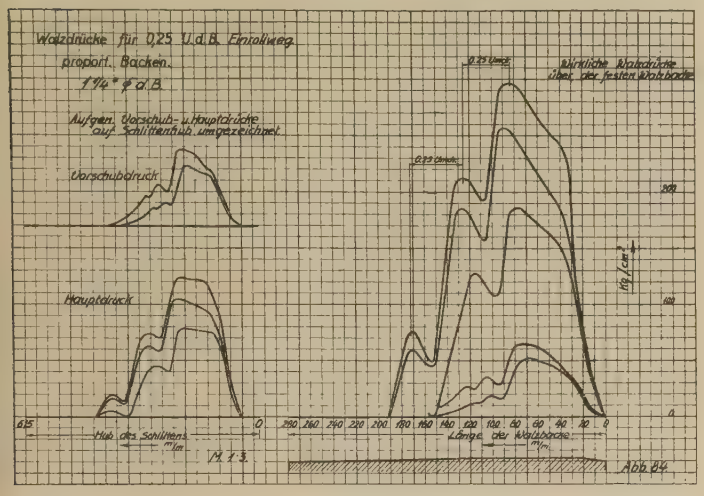


Abb. 84

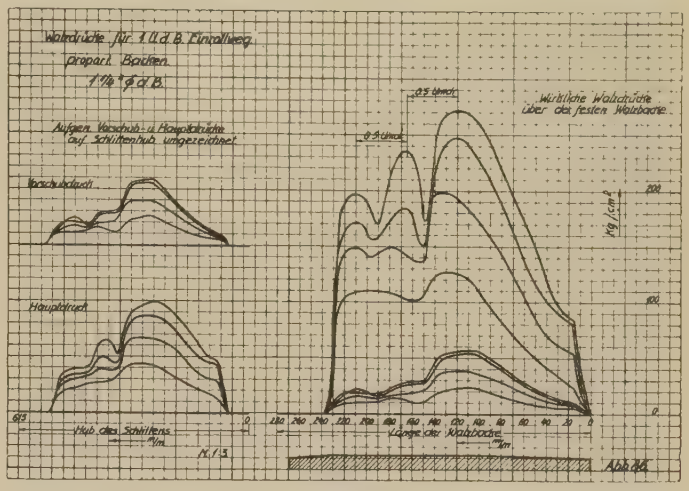


Abb. 86

von 2 Umdrehungen hat. Die Messung des Flankendurchmessers ergab nur innerhalb der Grobtoleranz (DIN 2247) liegende Differenzen. Der Walzdruck ist schon nach ca. 200 mm — statt der ganzen Backenlänge von 280 mm — auf 0 zurückgegangen. Eine volle Ausnutzung der Backenlänge ist also nicht vorhanden.

Die Zahnrillen müssen ferner am Auslaufende der Walzbacken in etwa gleicher Höhe wie am Anfang stehen, d. h. sie müssen um die halbe

Praxis machen diese Schwierigkeiten trotz der durch die Härtung schon gewölbten Backenform häufig eine sehr kurze Anstellung nötig. Der Bolzen wird dann ähnlich wie bei den Backen mit 0,25 Umdrehung schnell eingewalzt und über dem größten Teile der Backenlänge egalisierend nachgerollt. Vielfach lassen dennoch die erzielten Toleranzen des Flankendurchmessers zu wünschen übrig.

Eine eingehendere **Betrachtung der Diagramme** (Abb. 69 bis 71) läßt im Druckanstieg und im Druck-

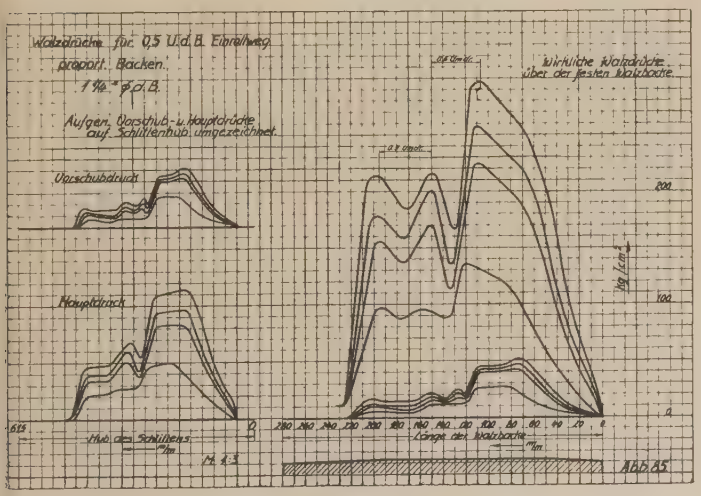


Abb. 85

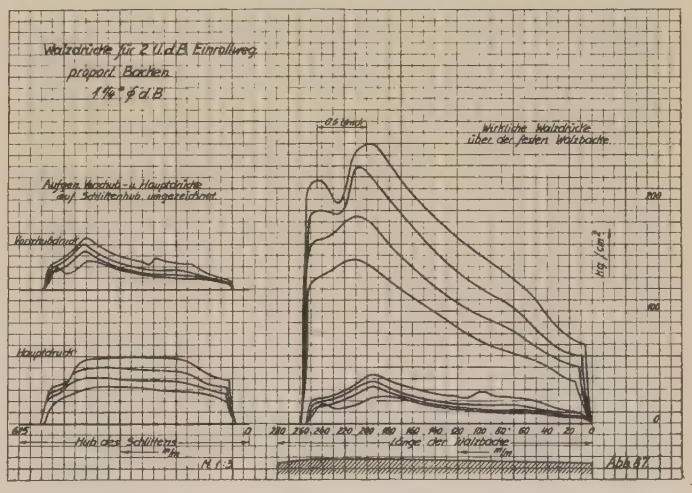


Abb. 87

Zahntiefe wieder zurücktreten, weil für ein sicheres Auswerfen des Bolzens eine genügende Freigabe notwendig ist . Ein sehr flacher Anschnitt kann deshalb nicht verwendet werden, trotzdem er den Druckabfall verlangsamen würde. Daher ist nur eine gewölbte Form des Auslaufs möglich und zwar so, daß er zunächst sehr langsam und dann stark zunehmend verläuft. Hierbei muß der schwach gekrümmte Teil

abfall weitere Merkmale erkennen, die mit der Backenform zusammenhängen: Die Druckabfallslinien laufen nicht in einförmiger Krümmung oder doch mit harmonischen Übergängen, sondern mit plötzlichen, wellenförmigen Erhöhungen vom höchsten Punkte auf 0 ab. Die Kurven für 0,25, 0,5 und 1 Umdrehung haben zwei, die für 2 Umdrehungen eine solche Welle. Für 0,25 U. sind sie

am stärksten ausgeprägt, während sie sich mit zunehmendem Einrollwege abzuschwächen scheinen. Nach den ausgewerteten Druckkurven (Abb. 84 bis 87) ist jedoch für 0,25 U. und 2 U. die Druckschwankung am geringsten, während sie bei 0,5 und 1 U. wesentlich stärker ist. Die Abstände der Wellenberge haben genau gleiche Länge voneinander und zwar 0,5 U. = 45 mm ca. und die gleiche Entfernung vom höchsten Druckpunkt der Kurve. Daraus ergibt sich, daß sie mit dem verformten Zustande des gewalzten Bolzens an dieser Stelle des Umfangs, also mit einer gewissen Unrundheit, infolge des plötzlich hier eintretenden Druckabfalls zusammenhängen. Die ungleiche Stärke der Druckschwankungen im Auslauf erklärt sich anhand Abb. 88, Kurve 16 und 17, dadurch, daß sie sich für 0,5 und 1 U. auf dem parallelen Teil der Backen auswirkt. Die Ungleichmäßigkeit im Gewindedurchmesser wird daher hier voll erfaßt und nachgeformt. Bei 0,25 Umdrehung dagegen weichen die Zahnrillen bereits zurück und die Ungleichmäßigkeit des Bolzens wird nicht mehr ganz nachgewalzt. Bei 2 U. liegt die Druckwelle auch auf dem parallelen Teil, hier ist sie aber deshalb weniger stark, weil das Gewinde bei dem langen Einrollweg bereits besser rund vorgewalzt ist. Der Bolzen war jedoch trotzdem nicht besser rund ausgewalzt als bei den kürzeren Einrollwegen.

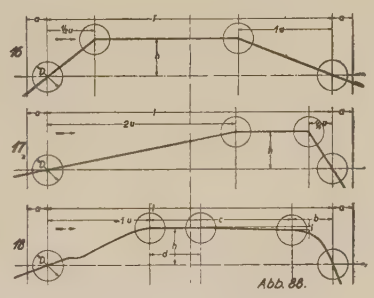


Abb. 88.

Bei allen vier Backenformen haben die Differenzen im Flankendurchmesser etwa gleich große Werte von 0,15 mm max. Der Grund hierfür muß in dem bei allen Kurven gleich ungünstigem Auslaufwege gesucht werden. Daher kann sich auch der lange Auslauf von 2 Umdrehungen für das Gewinde des Bolzens nicht günstig auswirken.

Die Druckanstiegslinie der Diagramme für 1 und 2 U. und z. T. auch diejenigen für 0,5 U. haben abgesehen von der oben erwähnten Umbiegung bei Erreichen des höchsten Punktes eine Knickung kurz nach Beginn des Einrollvorganges. Der an dieser Stelle erreichte Druck ist der Anfangsdruck, mit dem der Bolzen eigentlich zu rollen beginnt. Der Bolzen wird, wie eine genauere Beobachtung beim Einwalzen ergab, zunächst von der mitnehmenden Walzbacke zwischen beide Backen hineingezogen, erhält hierbei eine gewisse Anfangspressung durch Eindringen der Zahnrillen in das Material und wird dann rollend mitgenommen. Der Anfangsdruck ist nicht stets gleich, sondern nimmt mit der Länge des Bolzens und mit der Kürze des Einrollweges zu. Er hängt dabei mit der durch das elastische Nachgeben der Maschine notwendig werdenden Engerstellung der Backen zusammen. Diese war bei kurzem Einrollweg größer als bei längerem, daher ist auch die Einpressung des Bolzens in die Backen am Anfang und mithin auch der Ausgangsdruck größer. Bei 0,5 U. tritt die Knickung nur unwesentlich und bei 0,25 U. überhaupt nicht hervor, weil der anschließende Roll-Verformungsdruck ein weiteres Ansteigen der Drucklinie zur Folge hat.

Das Einpressen der Zahnrillen in den Bolzen mit Beginn des Rollens stellt eine Änderung des nach Abb. 48 und 49 ideal gedachten Einrollvorganges dar. Diese muß berücksichtigt werden, wenn bei längeren Einrollwegen die scharfe Knickung der Drucklinie möglichst vermieden werden soll. Der hohe Anfangsdruck bewirkt — abgesehen von der starken Beanspruchung des Werkzeuges an dieser Stelle — eine plötzliche Stoßbelastung der Maschine, die sich in ungleichmäßiger Abnutzung der Getrieberäder und der Gleitbahn und in einem Tourenabfall der Maschine bemerkbar machen muß. Letztere ist für den Walzprozeß insofern nicht von großer Bedeutung, als bei einer Maschine mit Kurbelmechanismus ohnehin mit ungleichförmiger Walzgeschwindigkeit gerechnet werden muß. Der Rollbeginn muß jedoch genügend weit hinter dem Totpunkt erfolgen, um ungünstige Kräftewirkungen zu vermeiden und mit einer ausreichenden Anfangsgeschwindigkeit zu arbeiten.

Die **Drehzahl der Maschine** betrug T = 25,5 U/p. Min. bei T = 850 U/p. Min. des Antriebsmotors. Die Betriebsdrehzahl für den Walzdurchmesser 1¼" beträgt T = 35 U p. Min. Hier wurde die geringere Tourenzahl gewählt, um bei der zur Verfügung stehenden Papiergeschwindigkeit des Schreibgeräts und der kurzen Rollzeit des Bolzens genügende Diagrammlängen zu erhalten. Die bei einer gleichen Drehzahl aufgenommenen Kurven gestatten auch einen Vergleich an sich. Die Abhängigkeit des Walzdrucks von der Drehzahl ist im übrigen nicht bedeutend, wie aus den Versuchen von W. Reichel hervorgeht. Hierfür dürfte die während des ganzen Rollweges vorhandene Ungleichmäßigkeit der Walzgeschwindigkeit von Einfluß sein.

Bei der vorhergehend erwähnten stets gleichen Stellung der Rollbacken zueinander und zu dem Totpunkt der Maschine war die Anfangsgeschwindigkeit bei einem Wege

$$x = 15 \text{ mm} = R \cdot (1 - \cos \alpha);$$

$$c = v \cdot \sin \alpha$$

$$= \frac{2 r \pi \cdot n \cdot 0{,}306}{2} = \frac{0{,}615 \cdot \pi \cdot 0{,}306}{2},$$

$$c = 7{,}55 \text{ m/mm}.$$

Die maximale Walzgeschwindigkeit betrug

$$c = \frac{v}{2} = \frac{0{,}615 \cdot \pi \cdot 25{,}5}{2} = 24{,}15 \text{ m/min}.$$

während die Auslaufsgeschwindigkeit am Ende der festen Walzbacke auf $c = \frac{48{,}3 \cdot 0{,}5}{2} = 12{,}08$ m/min. zurückging. Letztere war bei diesen Versuchen stets größer, weil die Backe nicht über ihre ganze Länge ausgenutzt wurde. Die Walzgeschwindigkeit wechselte also insgesamt von 7,55 bis 24,15 m p. min. Die geringe Anfangsgeschwindigkeit dürfte mit zu einer Erhöhung des Anfangsdruckes beitragen.

Ein Einfluß der Geschwindigkeit auf den Druckverlauf läßt sich aus den Diagrammen sonst nicht erkennen. Der Druck steigt ähnlich den Kurven VI, III, V und IX in Abb. 48 und 49 an, jedoch mit den Einschränkungen, die aus der Federung der Maschine entstehen. Am günstigsten verläuft der Druck bei 1 U. in ruhig ansteigender Kurve und mit allmählicherem Übergang in die Druckabfallslinie. Bei 2 U. machen sich gewisse Schwankungen im Druckanstieg und zwar im ersten Teil vom Anfangspunkt bis zu etwa einer Umdrehung des Bolzens bemerkbar. Diese entstehen aus dem Tieferwalzen der vorgeformten Zonen, wie sie auch in Kurve IX Abb. 49 zu sehen sind. Mit größer werdendem Druck verschwinden die feineren Einzelheiten infolge des gleichzeitigen Walzens mehrerer Gewindegänge, wobei die stets auftretenden Ungleichmäßigkeiten einander ausgleichen.

Die **Vorschubdruckkurven** der Diagramme folgen im wesentlichen dem Verlauf der ausgewerteten Hauptdruckkurven, da sie einen Teildruck des nicht rein radialen Walzdruckes darstellen. Sie sind in den Diagrammen reelle Drücke im Verhältnis der Meßdosen-Druckfläche auf der Basis gleichförmigen Papiervorschubs, also gleicher Zeiten, und wurden den Hubstellungen des Schlittens entsprechend umgezeichnet. Die Kurven verlaufen unruhiger wie die Hauptdruckkurven und geben kleinere Druckschwankungen besser wieder. Die höchsten Druckpunkte stimmen nicht mit denen des Hauptdrucks überein, sondern liegen am Übergang des Anschnitts in dem parallelen Teil der Walzbacken. Deutlich geht dies aus den Kurven für 0,5 U. und 1 U. hervor, bei denen der Druck nach dieser Drehung des Bolzens abfällt, während der Hauptdruck noch ansteigt. Hierdurch wird die Unabhängigkeit dieses weiteren Druckanstiegs von der Form der Walzbacke bewiesen.

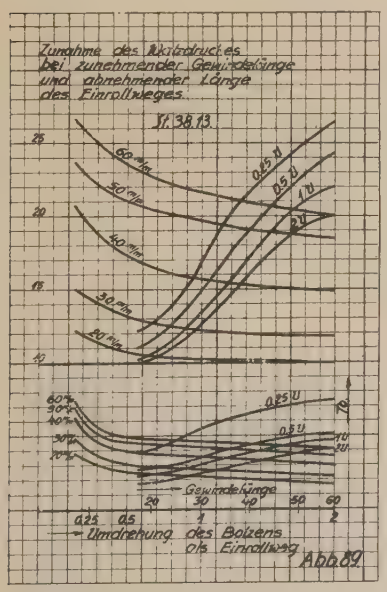


Abb. 89

In Abb. 89 sind die **Druckkurven für verschiedene Einrollwege und Bolzenlängen** aufgetragen. Erstere zeigen einen mit zunehmendem Rollwege zunächst schnelleren und dann langsamer werdenden Druckabfall. — Diese Charakteristik ist für die Haupt- und Vorschubdrücke ebenso gleichartig wie für verschiedene Bolzenlängen. Bei letzteren geht sie aus dem zunehmendem Abstande der Druckkurven mit abnehmendemEinrollwege hervor. Der Druckanstieg für zunehmende Bolzenlängen nimmt anfangs beschleunigt zu, läuft dann nahezu proportional ansteigend und hat von 50 mm ab eine teils geringe Umbiegung der Kurven. Der zwischen 20 und 35 mm ca. verstärkend zunehmende Druckanstieg kann daraus erklärt werden, daß die kurzen Bolzen bei dem 7-Gang-Profil sehr wenig Gewindegänge haben. Die an den beiden Enden des Bolzens liegenden Gänge — ein bis zwei Gänge an jeder Seite — wurden bei 1¼" nicht ganz ausgewalzt, weil das Material hier dem Preßdruck nachgibt. Dadurch tritt eineVerringerung desPreßdruckes ein. Der Anteil der nicht ausgewalzten Gänge im Vergleich zur Anzahl der Gänge auf dem Bolzen ist bei den kurzen Bolzen größer und nimmt geometrisch ab.

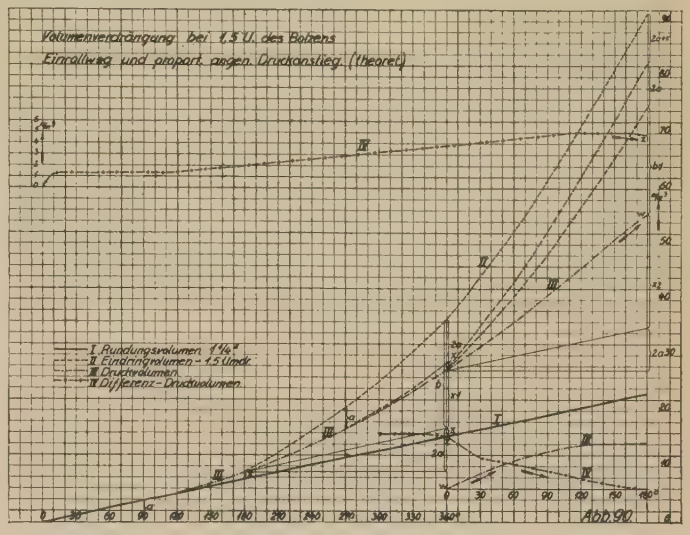


Abb. 90

Daher nimmt der hierdurch bedingte Druckanteil entsprechend zu. Mit größerer Gewindelänge ist der Einfluß der nicht ausgewalzten Gänge unbedeutender, so daß ein mit der Gewindelänge proportional zunehmender Walzdruck erwartet werden müßte. Das hier ermittelte Zurückbleiben des Druckanstiegs kann mit der besseren Führung der längeren Bolzen senkrecht zu den Backen im Zusammenhang stehen, die ein gewisses Schwanken des Bolzens und daraus entstehende geringe ungleichmäßige Materialverschiebungen nicht mehr auftreten läßt.

b) Walzbacken mit besonderer Kurvenform.

Unter Zugrundelegung der bei obigen Walzdruckkurven gemachten Beobachtungen wurde jetzt eine Walzbackenform entwickelt, die einen möglichst günstigen Druckverlauf beim Einrollen und eine geringe Toleranz des Flankendurchmessers ergeben sollte.

Die Walzdruckkurven über zunehmendem **Einrollwege** hatten ergeben, daß der Druck bis etwa **1,5 U.** am stärksten abnimmt. Es wurde deshalb die Kurve für diesen Weg d. h. die halbe Länge der Walzbacke ausgelegt. Unter Berücksichtigung einer weiteren halben Drehung für das Rundauswalzen des Bolzens blieb — bei 280 mm Gesamtlänge — noch eine Umdrehung ca. für die Druckablösung im Auslauf übrig.

Die rechnerische Ermittlung der Kurve erfolgte in ähnlicher Weise wie sie für die Feststellung des Druckanstiegs bei proportional zunehmendem Einrollweg oben durchgeführt worden war.

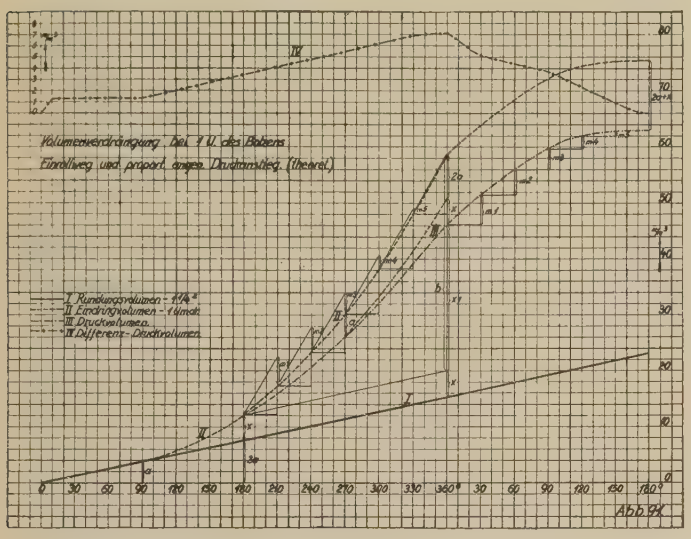


Abb. 91

Hierbei wurde das gleich zu Beginn der Mitnahme des Bolzens erfolgende starke Einpressen der Zahnrillen berücksichtigt. Die Feststellung ergab, daß sich die Zähne bei einem Einrollwege von 1,5 U. mit ihrer ganzen Rundung eindrückten. Damit ging die oben errechnete Volumenzunahme bei allmählichem Eindringen der Rundung in eine solche mit voller Rundung über. Dieses Volumen steigt, wenn ein tieferes Eindringen der Backe nicht erfolgt, proportional an. Der gradlinige Anstieg des Rundungsvolumens wurde als Ausgangsvolumen angesehen, dem zunehmende Volumina überlagert wurden. (Abb. 90, Kurve I.). Das Rundungsvolumen betrug für den ganzen Umfang des Bolzens 15,6 mm³ mithin für $^1/_{12}$ U. = 1,3 mm³ und für 1,5 U. = 23,4 mm³ (s. Endpunkt der Kurve I.).

Das Zusetzen von Volumen erfolgte nicht bereits bei der ersten Teildrehung von 30 °, da sonst das Einpressen der Zähne infolge des verstärkten Anstiegs der Walzbacke vergrößert worden wäre und damit die Grundlage der Ermittlung verändert worden wäre, sondern erst nach 90 ° Drehung. Von hier ab wurden Volumina zugesetzt, die sich mit jeder Teildrehung gleichmäßig vergrößerten. Sie begannen mit 0,1 mm³ und stiegen um 0,3 mm³ bis auf 3,7 mm³ nach $16 \times 30^\circ = 480^\circ$. Von hier ab bis 540 ° erfolgte kein weiterer Zusatz von Volumen, um einen guten Druckübergang zu erhalten. Der weitere Druckanstieg mußte sich also abschwächen und hinter 540 ° mußte der Druck abnehmen.

Kurve III stellt zunächst das Druckvolumen bis 1,5 U. dar. Bei der nächsten halben Drehung kommen noch die Restvolumina für volle Eindringtiefe zur Verpressung (Kurve III rechts unten). In Kurve IV sind die zusätzlichen Differenzvolumina aufgetragen. Für die Ermittlung der dem gewünschten Walzdruck entsprechenden Eindringtiefe wurde berücksichtigt, daß nach der ersten halben Drehung bereits vorgewalzte Volumina vorhanden sind. Diese wurden zu den Volumina nach Kurve III addiert und ergaben die tatsächlichen Eindringvolumen-Kurve II. Danach ist bei 180 ° Drehung das bis dahin angestiegene Rundungsvolumen 2 a plus dem zusätzlichen Druckanstiegvolumen x vorhanden. Nach 360 ° hat sich dieses Volumen um das weitere zuzätzliche Volumen x_1 und das vorgewalzte Volumen 2a plus x, insgesamt um b über der Kurve I vergrößert. Nach wieder 180 ° addieren sich das weiter angestiegene Zusatzvolumen und das gesamte bis 360 ° vorgewalzte Volumen.

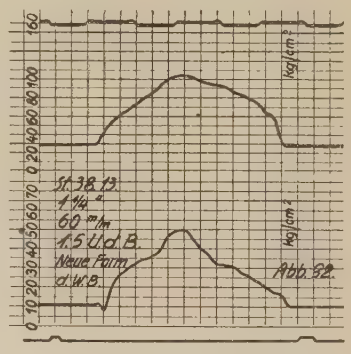


Abb. 92

Diesem Volumenanstieg zufolge wurde die Eindringtiefe für das Trapezstück des Profils aus Kurve II, Abb. 47 entnommen. Das Volumen wurde dabei über Kurve I als 0-Linie gerechnet, da diese das Rundungsvolumen angibt. In schrittweisem Näherungsverfahren folgte für je $^1/_{30}$ Drehung des Bolzens aus der dabei eintretenden Volumenvergrößerung durch Division des Rollweges die Profil-Eindringfläche, der eine bestimmte Eindringtiefe zugehört.

Abb. 91 gibt eine gleiche Entwicklung des Eindringvolumens für 1 U. Einrollweg an. Hier sind die nach vollem Eindringen des Profils für die

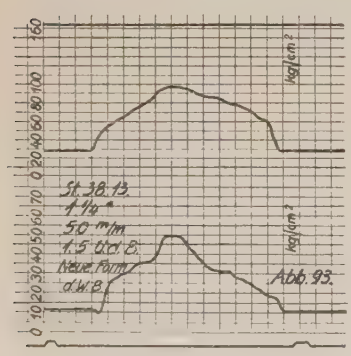


Abb. 93

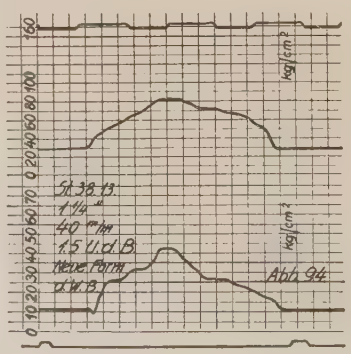


Abb. 94

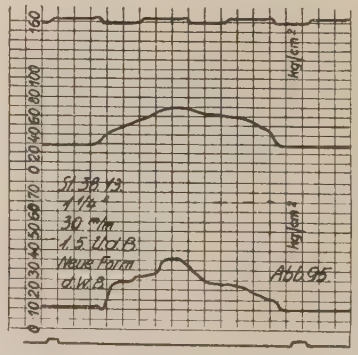


Abb. 95

nächste halbe Drehung noch verbleibenden Restvolumina besonders gekennzeichnet.

Die Versuchsrollbacken für 1,5 U. Einrollweg erhielten hinter diesem ein parallel verlaufendes Stück von einer halben Umdrehung zur Egalisierung und anschließend einen Auslauf in Form einer Parabel-Kurve 4. Grades. Diese wurde nach Vorversuchen mit verschiedenen Kurvenformen für die Ablösung des Spannungsdruckes als günstig festgestellt, da ihre sich der Horizontalen anschmiegenden Gestalt eine ganz allmähliche Freigabe des Bolzens ermöglichte.

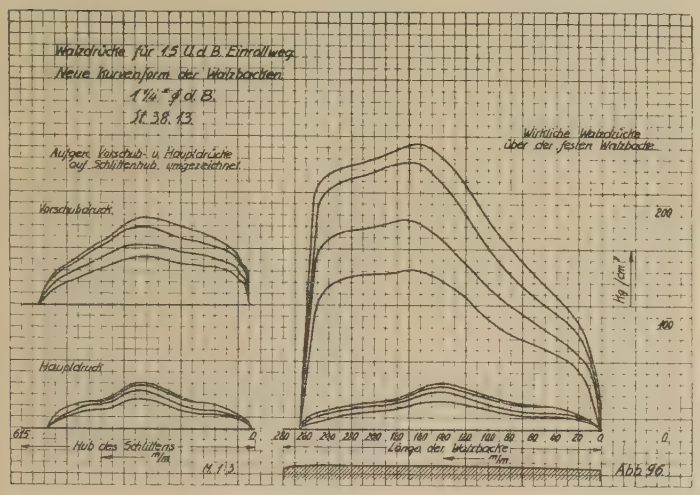


Abb. 96

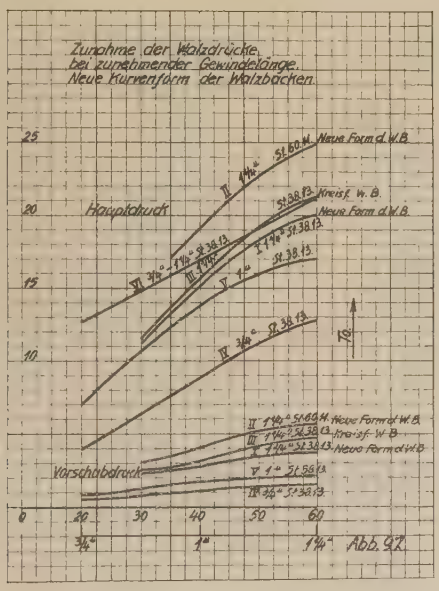


Abb. 97

Die Diagramme, Abb. 92—95, und die ausgewerteten Druckkurven, Abb. 96, von Bolzen mit 60, 50, 40 und 30 mm Länge zeigen so auch das Fehlen der bei den vorhergegangenen Versuchen aufgetretenen Pendelung des Walzdrucks im Auslauf. Der Haupt- und Vorschubdruck gehen ruhig und in harmonischem Übergang vom höchsten Punkt auf 0 herunter. Druckwellen treten nicht auf. Beim Einrollen hat der Walzdruck einen gleichmäßigen Übergang vom Anfangsdruck bei Mitnahmebeginn des Bolzens zum eigentlichen Rolldruck und vom höchsten Druckpunkt in den abfallenden Druck. Eine leichte Biegung der Kurve nach dem Rollbeginn ist noch vorhanden; diese würde durch einen bei 90° Drehung schneller erfolgenden Anstieg der Walzenbackenkurve wahrscheinlich ausgeglichen werden.

Der Walzdruckanstieg über verschiedenen Bolzenlängen ist aus Kurve I, Abb. 97, ersichtlich. Der größte Druck für 60 mm entspricht etwa demjenigen für 2 U. Einrollweg bei dem proportionalen Backen. Die Kurve ähnelt im übrigen den entsprechenden der obigen Versuche. Die Unrundheit des Flankendurchmessers der Bolzen war hier bedeutend verringert und betrug 0,05 mm max. —

Mit diesen Backen wurden noch Bolzen aus Material höherer Festigkeit, St. 60, 11 gewalzt, um festzustellen, ob eine Änderung des Walzdruckverlaufs hierdurch eintrat. Die Diagramme, Abb. 98—100, und Kurven Abb. 101 weisen jedoch sehr gleichartige Drucklinien auf. Kurve II, Abb. 97, gibt den Druckanstieg über verschiedenen Gewindelängen wieder. Danach liegt die Kurve 5000 kg ca. höher als die Kurve für St. 34, 13.

Abb. 102—105 geben **Druckkurven von kreisbogenförmig gestalteten Rollbacken** wieder. Diese stellen in der Form ihrer Rollflächen den Abschnitt eines Kreises dar, dessen Mittelpunkt in der Mittelsenkrechten der Backen liegt. Bei 280 mm Bakkenlänge und einer Bogenhöhe von 1,2 mm beträgt der Radius 8175 mm. Die Herstellung der Kreisbogenform bereitet bei diesem großen Radius Schwierigkeiten, wenn sie im Verhältnis 1 : 1 der Fräskurve erzeugt wird. Hier reduzierte sich der Radius zu

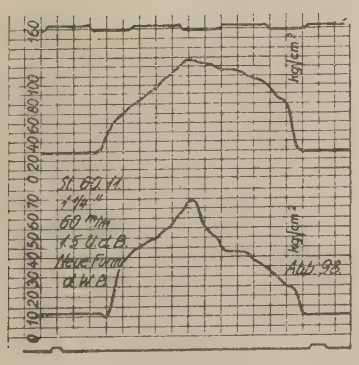


Abb. 98

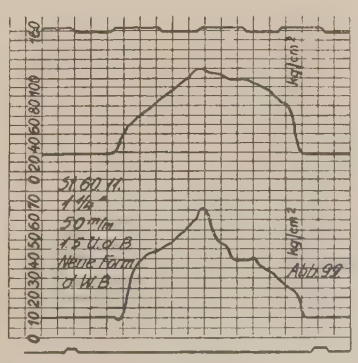


Abb. 99

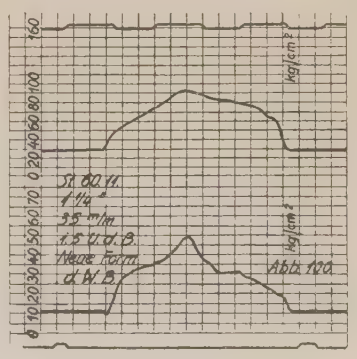


Abb. 100

290,2 mm bei einer Übersetzung von 1 : 30 der Fräsvorrichtung und die Kurve konnte in einfacher Weise durch Drehen hergestellt werden. Der Kreis-

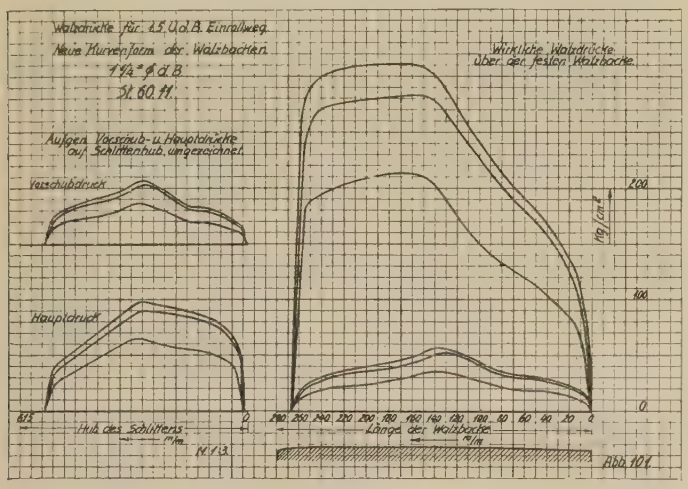


Abb. 101

bogen stellt die einfachste Kurvenform dar, die den Einroll- und Auslaufweg durch allmählichen Übergang verbindet. Sie hat aber den Nachteil, daß der

also der parallele Teil der Backen fehlt. Da jedoch der Radius sehr groß ist, kann dieser Mangel nicht sehr in Erscheinung treten.

Die Unrundheit des Flankendurchmessers dieser Bolzen lag im Mittel zwischen denen der obigen Versuche. Die Walzdruckkurven, Abb. 106, haben einen gleichmäßigen und ruhigen Verlauf. Die Hauptdruckkurven steigen schneller als bei den vorherigen Kurven und fallen im Vergleich zum Druckanstieg beschleunigter ab. Der Einrollteil der Kurven zeigt wieder die leichte Knickung bei Rollbeginn des Bolzens, dann einen fast gleichförmigen Anstieg bis 60 mm Rollweg und hier eine zweite Biegung, der ein gradliniges Stück folgt. Der Übergang vom Druckanstieg zum Druckabfall wird etwa kreisbogenförmig gebildet. Der Höchstdruck ist genau in Mitte der Walzbacke erreicht. Besonders gleichmäßig ist der Verlauf des Vorschubdruckes. Die Ausnutzung der Walz-

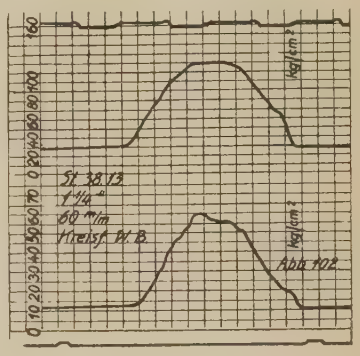


Abb. 102

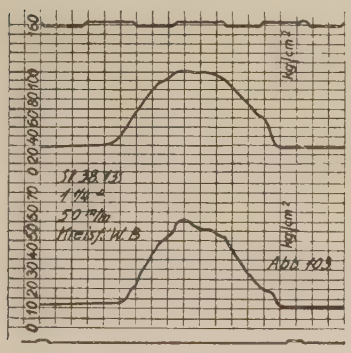


Abb. 103

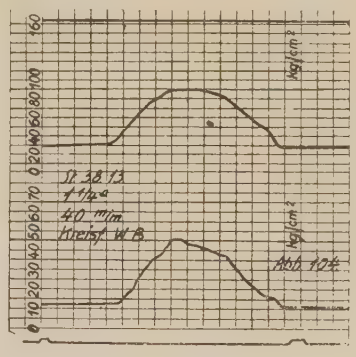


Abb. 104

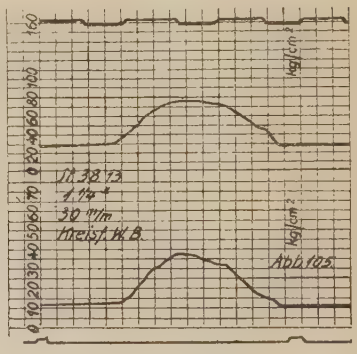


Abb. 105

Bolzen nicht ganz rund ausgewalzt wird, weil die Zahnrillen sich nach Erreichen der größten Eindringtiefe sofort wieder von dem Bolzen entfernen,

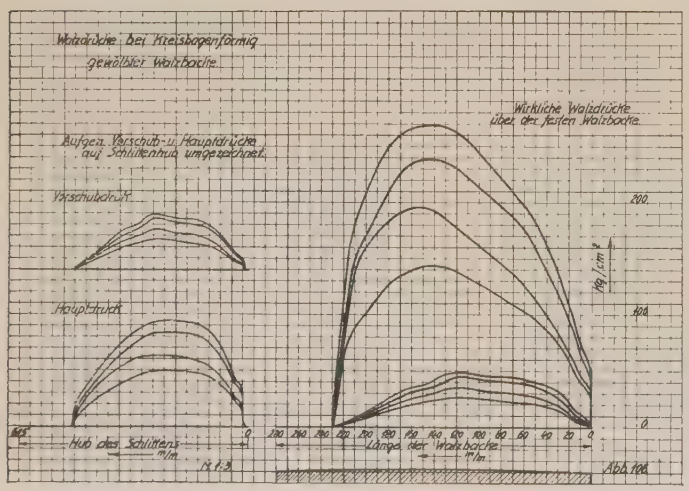


Abb. 106

backenlänge ist hier nur 235 mm gegenüber 265 mm bei der vorherigen Kurvenform. (Abb. 96). **Der Druckanstieg über zunehmender Gewindelänge**, K. III, Abb. 97, **hat ähnlichen Verlauf** wie bei den obigen Versuchen. Der Höchstdruck ist größer als bei K. I und entspricht etwa demjenigen für 1 U. Einrollweg, bei den proportionalen Backen.

Um einen Vergleich der Walzdrücke für **verschiedene Bolzendurchmesser** zu gewinnen, wurden nach diesen Versuchen Rollbacken für ¾" und 1" Whitw.-Gewinde mit einem Einrollweg von 3 bzw. 2 U. hergestellt und die Walzdrücke für Gewindelängen von 20, 40, 50 und 60 mm aufgenommen. Hinter dem Einrollwege folgte hier ein paralleles Stück von einer Umdrehung und dann der Auslauf als Parabel-Kurve 4. Grades. Abb. 107—111 bzw. 112—116 zeigen den Walzdruckverlauf und Kurve IV bzw. V, Abb. 97, den Druckanstieg über zunehmender Gewindelänge. Die Unrundheit im Flankendurchmesser ergab 0,03 mm max.

In Kurve VI ist dann der **Druckanstieg über zunehmendem Bolzendurchmesser** aufgetragen. Hiernach steigt der Druck **etwa proportional** an.—

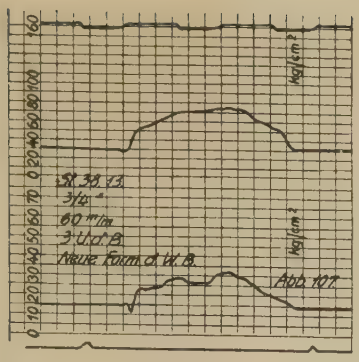


Abb. 107

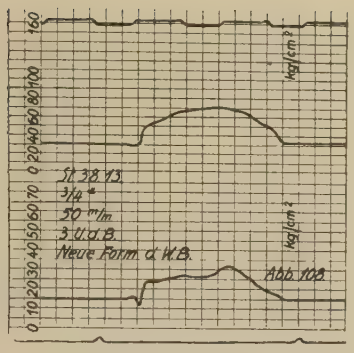


Abb. 108

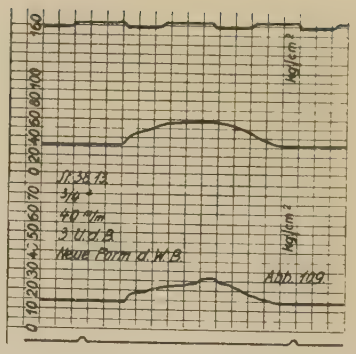


Abb. 109

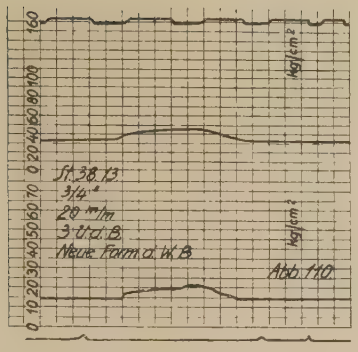


Abb. 110

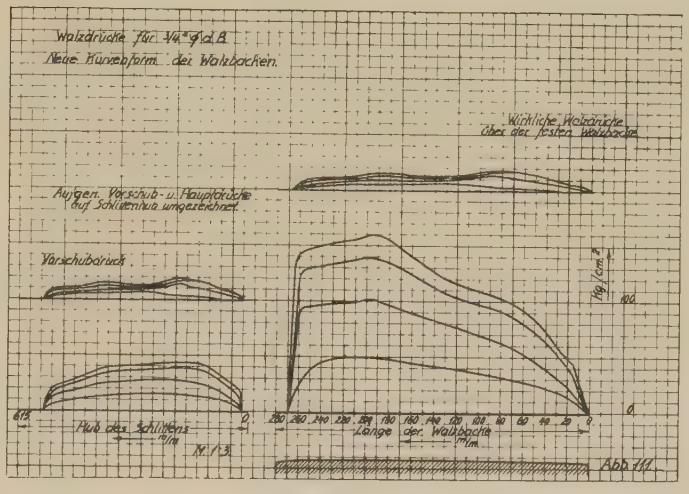


Abb. 111

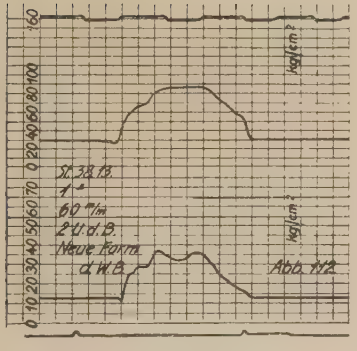


Abb. 112

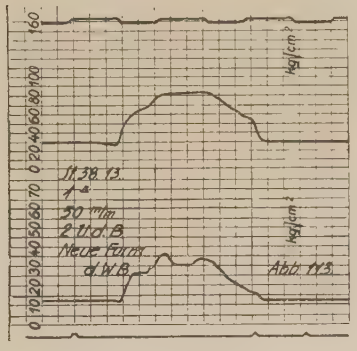


Abb. 113

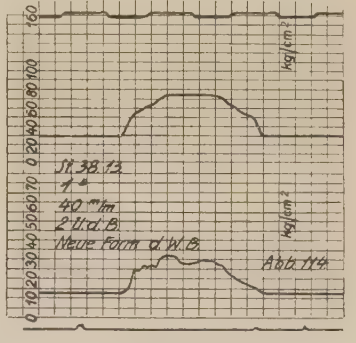


Abb. 114

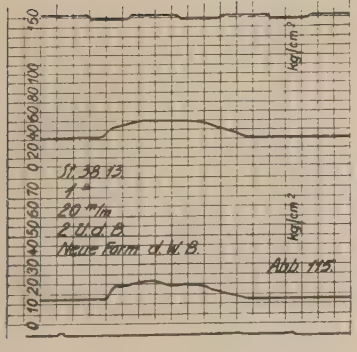


Abb. 115

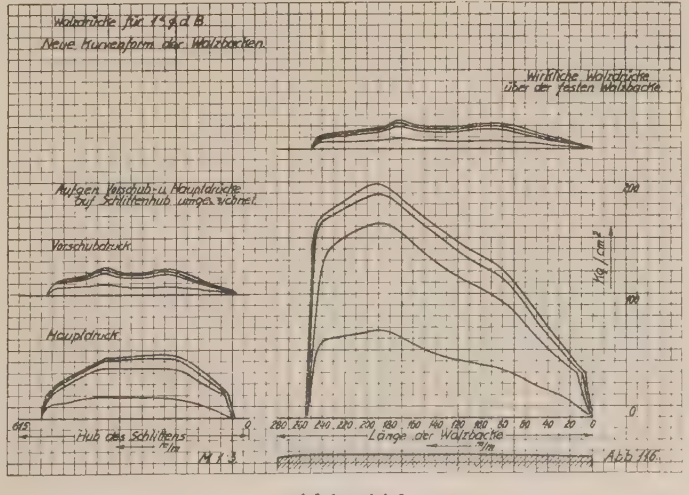


Abb. 116

VII. Zusammenfassung.

Die obigen Untersuchungen haben ergeben, daß das durch Rollen erzeugte Gewinde durch homogene Materialverformung entsteht und der innere Zusammenhang des Gefüges bei korrektem Walzen bis in die Zahnspitze hinauf erhalten bleibt.

Das Gewinde entsteht unter der pressenden Wirkung der Zahnrillen der Gewinderollbacken bei ihrem Tiefereindringen während des Rollens. Hierbei unterliegt das zwischen den Flanken der Zähne erfaßte Material dem beiderseits nach der Mitte zu zusammendrückenden Einflusse und gibt nach außen in den freien Raum ihres Zahngrundes nach. Es tritt eine Wölbung der vorhandenen oder gedachten, in Längsrichtung des Bolzens laufenden Schichten ein, die im wesentlichen der Kontur des Zahnes folgt und sich von innen nach außen zunehmend verstärkt.

Das fertiggerollte Gewinde weist eine besonders am Zahngrunde und an den Flanken sehr starke Verzerrung der Kristallkörner auf, die jedoch sowohl nach dem Zahninnern als auch nach dem Kern des Bolzens zu sehr rasch abnimmt.

Eine Tiefenwirkung der Verformung auf das Gefüge läßt sich vom Zahngrunde bis etwa 0,5 Zahntiefe nach der Bolzenachse zu erkennen.

Die Gewinde-Rollversuche haben ferner zur Ermittlung der Beziehungen zwischen Walzdruck und Walzbacke geführt. Es wurden sowohl die beim Walzen auftretenden Maximaldrücke festgestellt, als auch der Druckverlauf über dem ganzen Rollwege vom Beginn der Mitnahme des Bolzens bis zum Auswerfen untersucht.

Die Grundlage hierfür wurde dadurch geschaffen, daß Walzbacken mit planmäßig erzeugter Wölbung der Rollflächen verwendet wurden, die bei verschiedener Gestaltung erst eine Beurteilung des Druckverlaufs ermöglichten. Mit der Herstellung dieser Backen war einerseits eine eingehendere Prüfung von legierten Spezialstählen auf ihre Beständigkeit gegen Verziehen beim Härten und die Verwendung einer geeigneten Abkühlvorrichtung verbunden; andererseits wurde eine Sonderfräsvorrichtung entworfen und werkstattgemäß ausgeführt, die das Einfräsen jeder gewünschten Kurvenform über die Länge der Backen ohne teure Schablonen und mit großer Genauigkeit (0,02 mm) gestattete.

Druckaufnahmen gerollter Bolzen ergaben bei gleichförmiger Gestaltung der Rollbacken einen mit zunehmenden Einrollwege gleichartigen Druckabfall des Haupt- und Vorschubdruckes. Die Druckkurven für zunehmende Gewindelänge haben bei verschiedenartig geformten Rollkurven ähnlichen Anstieg.

Der allgemeine Druckverlauf zeigte einen bei ungünstiger Gestaltung des Rollvorganges, wie er vielfach bei den in üblicher Weise geradlinig gefrästen und durch Härteverziehung gewölbten Walzbacken vorhanden ist, erheblichen Einfluß der elastischen Aufweitung des Maschinenkörpers. Dieser macht sich bei ansteigendem Druck im Einrollen und besonders auch bei nachlassendem Druck durch starke Schwankungen des Rolldrucks bemerkbar: Das Gewinde ist nicht genügend rund gerollt und überschreitet enger gehaltene Toleranzen.

Diese Erscheinungen hängen im übrigen mit der Größe des Gewindeprofils und auch mit der Starrheit der Maschine zusammen. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß sich eine gewisse Federung auch bei sehr kräftig gebauten Maschinen nicht wird ganz vermeiden lassen. Durch besondere Ausbildung der Rollbacken wurde hier unter möglichster Ausnutzung der Backenlänge, die mit 280 mm für 1¼" Gewinde als sehr kurz angesehen werden muß, eine ungünstige Wirkung des Spannungsdruckes unwirksam gemacht und ein gut rund gewalztes Gewinde erhalten.

Neben der hierdurch bewirkten Verbesserung des Paßsitzes der Schraube besitzt die Erstellung von Gewinderollbacken mit bestimmten Kurvenformen des Rollweges rein praktische Vorteile, die dadurch gekennzeichnet sind, daß ein schnelles und von einem Einsteller unabhängiges Einrichten der Backen ermöglicht wird. Ein längerer Stillstand der Maschine, der besonders bei Fließarbeit hinderlich ist, wird dadurch ebenso vermieden, wie durch die stets gleiche Ausführung der Walzbacken ein auch stets gleicher Verformungsprozeß und eine gleiche Güte des Gewindes gewährleistet ist.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, Herrn Professor K. Gottwein, dem Direktor des Versuchsfeldes für Werkzeugmaschinen, sowie Herrn Professor R. Krauß herzlichst zu danken, für das rege Interesse und die Unterstützung, die sie meiner Arbeit angedeihen ließen.

Lebenslauf.

Ich, Rudolf Seltmann, wurde am 22. Mai 1895 als Sohn des Oberingenieurs Rudolf Seltmann zu Breslau geboren und besuchte das hiesige König-Wilhelms-Gymnasium bis zu der im Jahre 1915 abgelegten Reifeprüfung. Dann trat ich ins Heer ein und war als Funker und späterer Reserve-Offizier bis Kriegsende an der Westfront. Vom Winter-Semester 1918 ab besuchte ich die Technische Hochschule zu Breslau und bestand im Mai 1922 das Diplom-Hauptexamen. In den folgenden Jahren war ich zunächst bis 1925 in Berlin bei den Bergmann-Elektr.-Werken und der A. E. G. Turbinenfabrik als Konstruktions-Ingenieur und bin von da ab bis heute bei der Archimedes A.-G. als Betriebs-Ingenieur und jetziger Betriebs-Oberingenieur tätig.

Tafel I

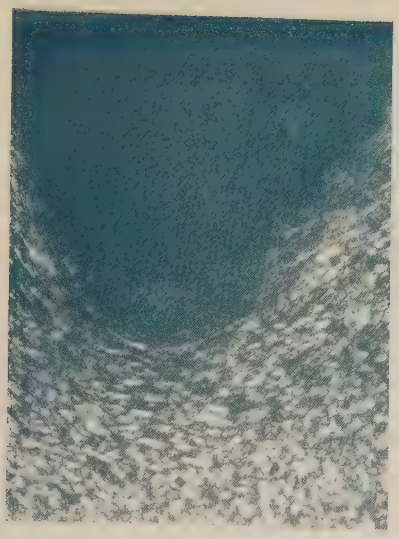


Abb. 1

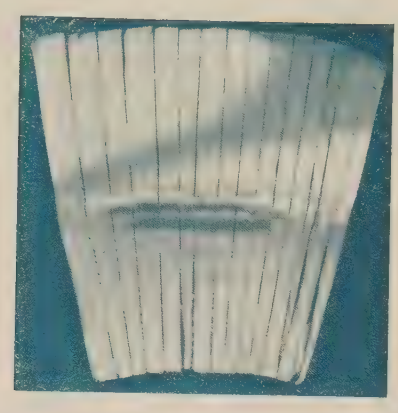


Abb. 9

Abb. 3

Abb. 4

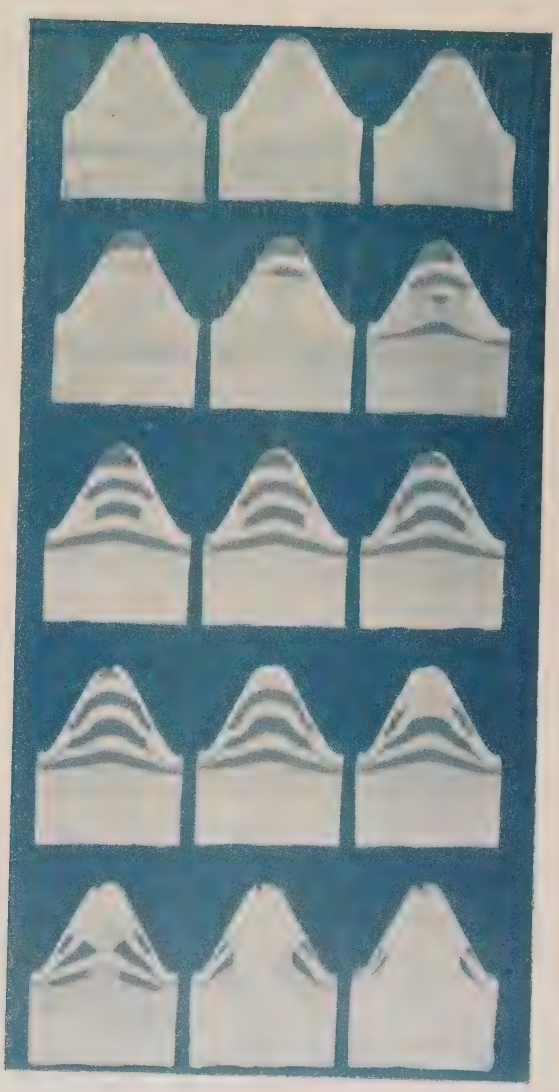


Abb. 10

Abb. 11

Abb. 12

Abb. 13

Abb. 14

Tafel II

Abb. 20

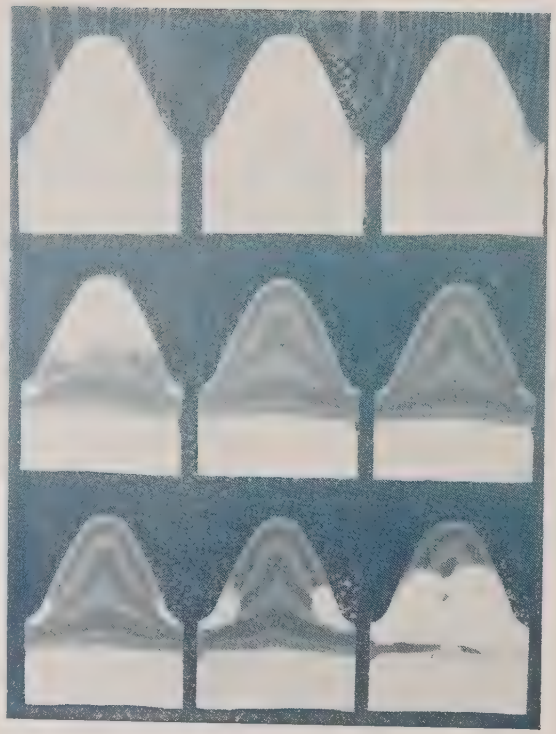


Abb. 21

Abb. 22

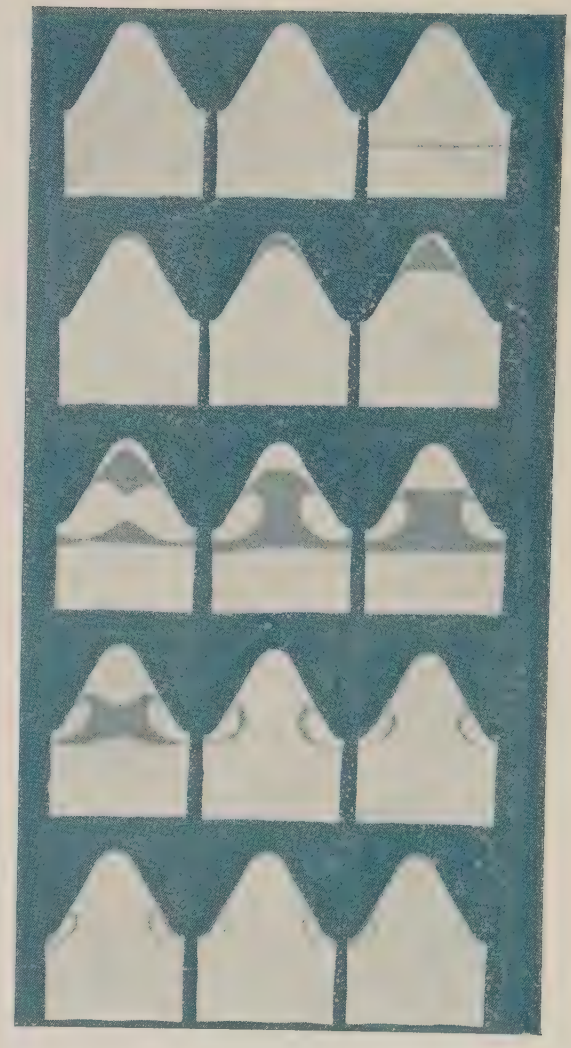


Abb. 23

Tafel III

Tafel IV

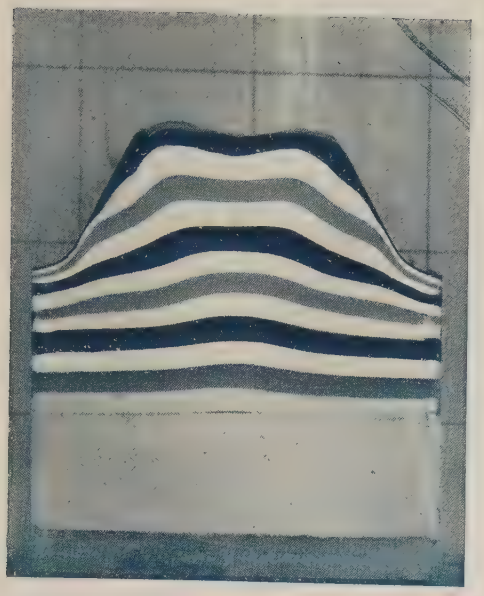


Abb. 25

Abb. 26

Abb. 27

Abb. 28

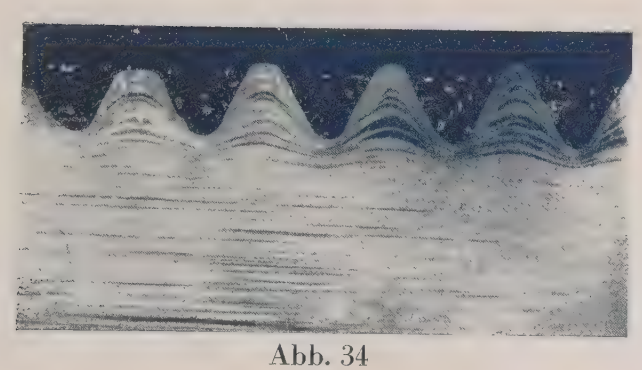


Abb. 34

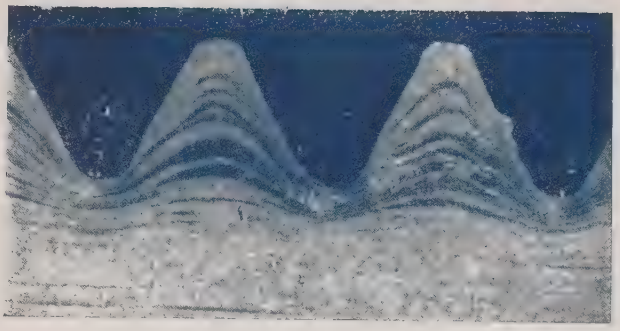


Abb. 35

Tafel V

Abb. 29

Abb. 30

Abb. 31

Abb. 16

Abb. 17

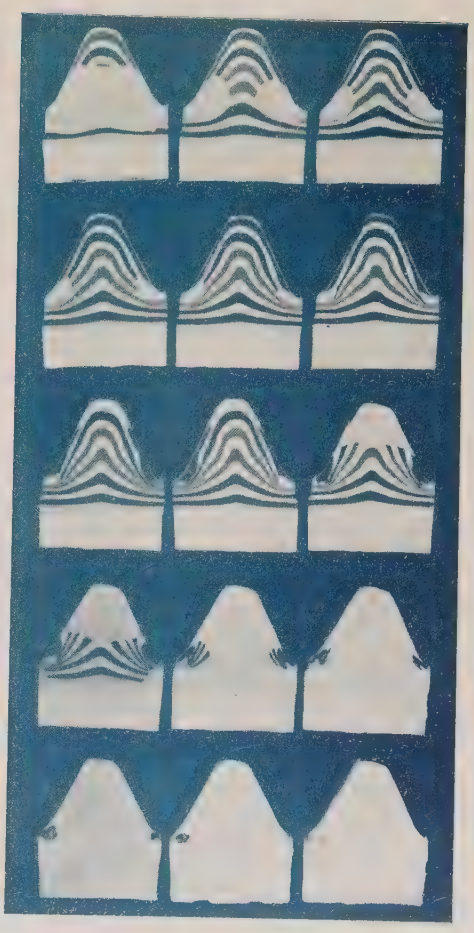


Abb. 18

Tafel VI

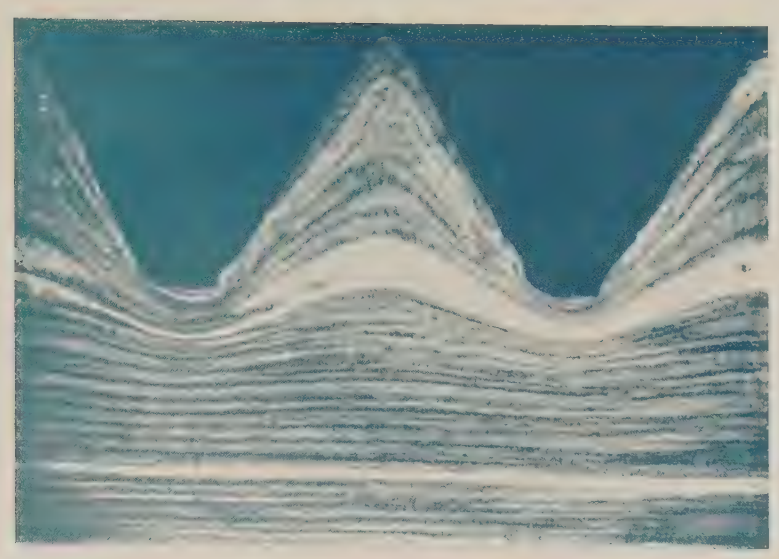


Abb. 32

Abb. 33

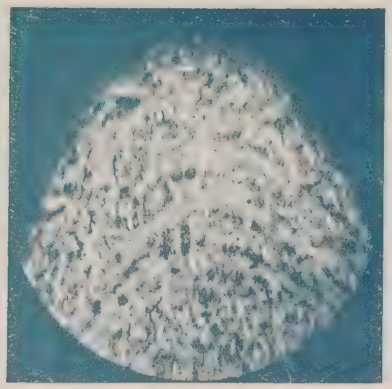


Abb. 36

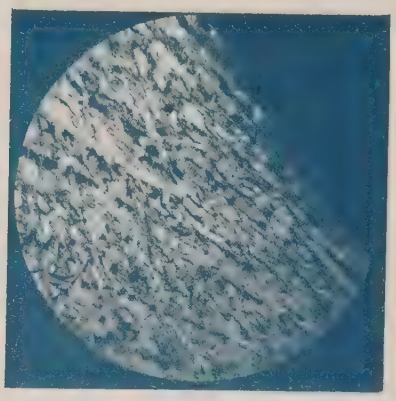


Abb. 37

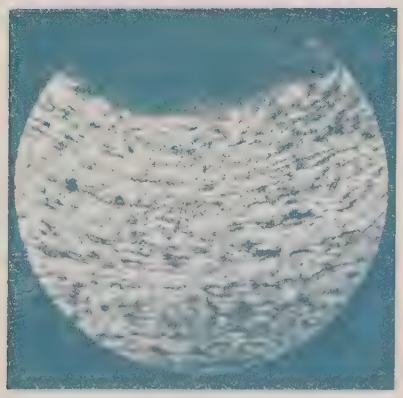


Abb. 38

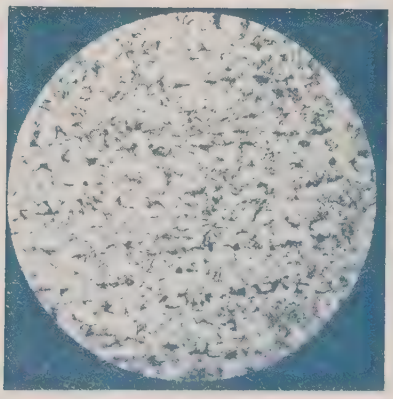


Abb. 39

Tafel VII

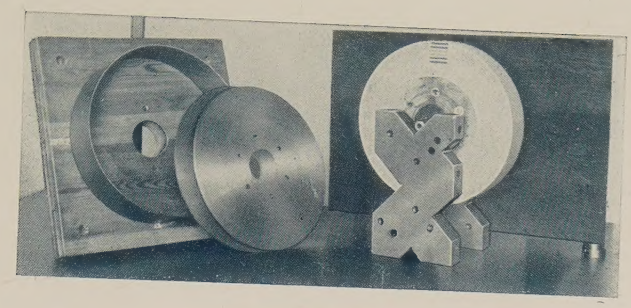


Abb. 7

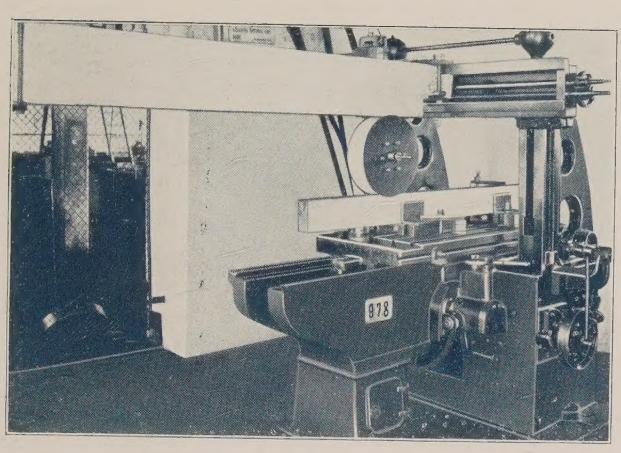


Abb. 5

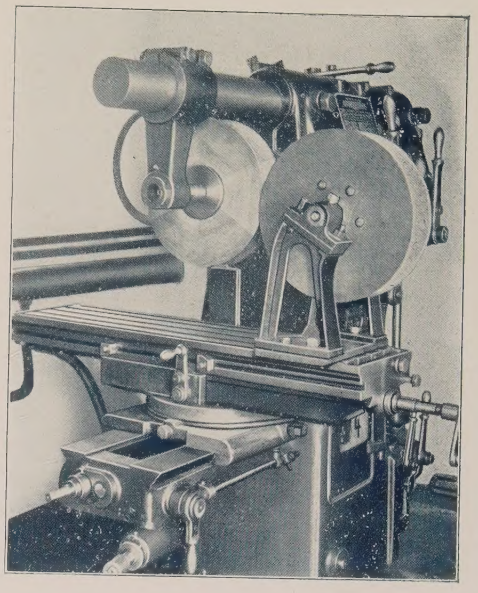


Abb. 19

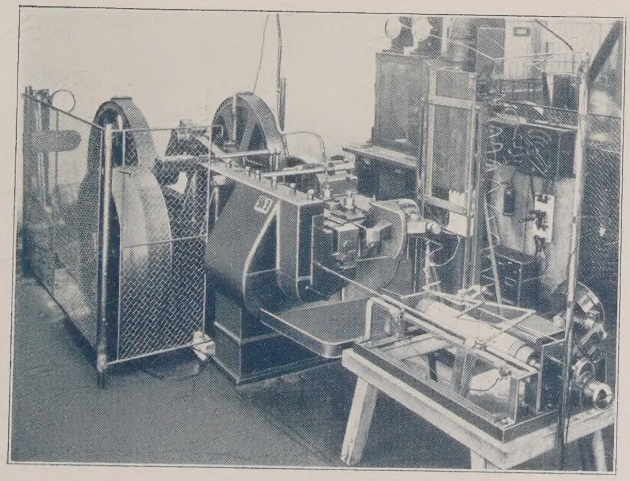


Abb. 65

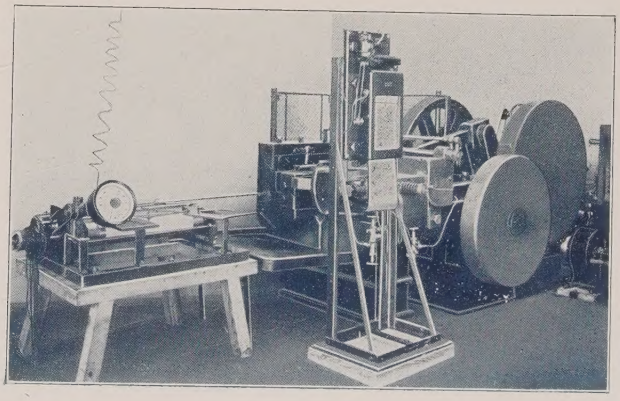


Abb. 66